

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTÍSIMA CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE MEDIO AMBIENTE Y ENERGÍA



UCSC

Integración de sistema FV y evaluación preliminar de desempeño de Secador Geosolar UCSC

Cristian Javier Garrido Fuentes

Informe de Habilitación Profesional para optar al título de:
Ingeniero Civil Eléctrico

Profesor Patrocinante:
Guillermo Ramírez A.

Profesores Guía:
Dra. Ana Narvárez D.
Dra. Laura Azócar U.

Concepción, junio de 2023

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTÍSIMA CONCEPCIÓN
Facultad de Ingeniería
Departamento de ingeniería civil eléctrica.

Profesor Patrocinante:
Guillermo Ramírez.

Integración de sistema FV y evaluación preliminar de desempeño de Secador Geosolar UCSC

Cristian Javier Garrido Fuentes

Informe de Habilitación Profesional
para optar al Título de

Ingeniero Civil Eléctrico

junio 2023

Resumen

El consumo de biomasa como combustible para calefacción ha aumentado considerablemente, lo que ha generado la necesidad de un proceso eficiente de secado, especialmente para la producción de pellets. En este estudio, se evaluó el secado de biomasa en el laboratorio de secado Geosolar de la UCSC, con el objetivo de controlar el ambiente y la energía necesaria para eliminar la humedad del material vegetal.

Los hallazgos y conclusiones obtenidos a partir del análisis realizado en el laboratorio se resumen en este informe. Se examinaron y caracterizaron diversas fuentes de calor, como la bomba de calor geotérmica y los sistemas aerotérmicos UCSC y Grammer, y se integró un sistema fotovoltaico para el suministro de energía renovable.

Durante el análisis, se identificó que el sistema fotovoltaico no puede cubrir completamente la demanda eléctrica del generador de calor geotérmico. Sin embargo, se implementó el suministro de energía del sistema fotovoltaico a las cargas paralelas, lo que resultó en una reducción del consumo y los costos operativos.

En cuanto a la bomba de calor geotérmica, se observaron deficiencias en la transferencia de calor debido a un coeficiente bajo entre la tierra y las tuberías intercambiadoras de calor. En el caso del secado con fuentes aerotérmicas, se logró una reducción significativa de la humedad en el aserrín mediante el funcionamiento constante de los sistemas aerotérmicos. Esto permitió alcanzar temperaturas adecuadas en la sala de secado y resalta la importancia de un almacenamiento adecuado del material durante el proceso para obtener un secado homogéneo. Se recomienda reducir la distancia entre la superficie y el centro del material para lograr mejores resultados.

En uno de los sistemas aerotérmicos, específicamente el UCSC, se observó un problema con el ventilador centrífugo utilizado en la sala de secado, el cual alcanzaba temperaturas elevadas. Esto podría tener efectos negativos en su funcionamiento a largo plazo, por lo que se recomienda reubicarlo fuera de la sala de secado.

En conclusión, se destaca la necesidad de contar con un proceso eficiente de secado de biomasa debido al creciente consumo de leña en el sector residencial. Se presentaron propuestas de mejora, como la combinación de diversas fuentes de calor y el uso de energía renovable, para abordar esta necesidad. Estas conclusiones proporcionan una base sólida para futuras investigaciones y mejoras en términos de eficiencia energética y rendimiento.

Agradecimientos

Mis principales agradecimientos a mis padres y hermanos, que me han apoyado desde siempre y me enseñaron el valor de la educación, motivándome a seguir estudiando sin parar y perfeccionando mis conocimientos todos los días.

Muy agradecer en especial al Profesor Guillermo Ramírez. Por el apoyo, comprensión y motivación que tuvo conmigo a lo largo de esta etapa desarrollando mi proyecto de tesis que fue fundamental, y también a lo largo de mi desarrollo académico.

Agradecido enormemente a todos los profesores que me han enseñado valores, por su dedicación y ganas de enseñar, que creaban un ambiente grato en clases siendo importante para no rendirse en este camino.

Y mis amigos cercanos que me apoyaron y me dieron su ayuda para salir adelante, mis compañeros con los cuales compartimos en las salas durante todos estos años. ¡Éxito en sus futuros ;

A los alumnos del pasado, presente y futuro de la carrera de Ingeniería Civil Eléctrica de la U.C.S.C.

Tabla de Contenidos

LISTA DE TABLAS	VII	
LISTA DE FIGURAS	VIII	
ABREVIACIONES	XII	
1	INTRODUCCIÓN	13
1.1	INTRODUCCIÓN GENERAL	13
1.2	TRABAJOS PREVIOS	14
1.2.1	<i>Secado de biomasa</i>	14
1.2.2	<i>Discusión</i>	17
1.3	OBJETIVOS	18
1.3.1	<i>Objetivo General</i>	18
1.3.2	<i>Objetivos Específicos</i>	18
1.4	ALCANCES Y LIMITACIONES	18
1.5	TEMARIO Y METODOLOGÍA	19
2	LABORATORIO DE SECADO GEOSOLAR.....	20
2.1	INTRODUCCIÓN	20
2.2	EL EDIFICIO LABORATORIO DE SECADO.....	21
2.3	SISTEMA DE REGISTRO DE TEMPERATURA.....	24
2.4	SISTEMA DE SECADO CON BOMBA DE CALOR GEOTÉRMICA.....	26
2.4.1	<i>Falla operacional en BCG</i>	31
2.4.2	<i>El intercambiador de calor para BCG</i>	33
2.4.3	<i>Ventilador FanCoil</i>	35
2.5	COLECTOR AEROTÉRMICO GRAMMER.....	37
2.6	COLECTOR AEROTÉRMICO UCSC.....	41
2.7	SISTEMA DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICO	47
2.7.1	<i>Inversores Victron Energy</i>	48
2.7.2	<i>Modos de operación de los inversores</i>	52
2.7.3	<i>Panel monitor Color Control GX</i>	54
2.7.4	<i>Paneles Fotovoltaicos</i>	56
2.7.5	<i>Banco de baterías</i>	57
2.8	DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	58
3	SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA.....	59
3.1	INTRODUCCIÓN	59
3.2	DISTRIBUCIÓN TABLEROS ELÉCTRICOS.....	59
3.3	ALIMENTADOR PRINCIPAL EDIFICIO.....	61
3.4	TABLERO GENERAL DEL LSG.....	62

3.5	TABLERO DE DISTRIBUCIÓN DEL LSG.....	63
3.6	TABLERO DE FUERZA Y ALUMBRADO DEL LSG.....	66
3.7	TABLERO ELÉCTRICO DC DEL LSG.....	67
3.8	CONFIGURACIÓN DE INVERSORES VICTRON ENERGY.....	69
3.8.1	<i>Control de carga de las baterías.</i>	76
3.8.2	<i>Inversor como fuente de energía principal.</i>	78
3.8.3	<i>Monitoreo del sistema inversores fotovoltaicos.</i>	79
4	INTEGRACIÓN SISTEMA FV EN SECADOR GEOSOLAR.....	81
4.1	INTRODUCCIÓN	81
4.2	CARACTERIZACIÓN DE DEMANDA ELÉCTRICA.....	81
4.3	PARTIDA DE LA BCG POR MEDIO DE INVERSOR SOLAR CON RED ELÉCTRICA.	84
4.4	PARTIDA ELÉCTRICA DE LA BCG SOLO CON INVERSOR SOLAR.....	85
4.5	INVERSOR SOLAR COMO SUMINISTRO ELÉCTRICO PARA CARGAS COMPLEMENTARIAS DE LA BCG.	87
5	ENSAYOS DE SECADO	94
5.1	INTRODUCCIÓN.....	94
5.2	ENSAYO DE SECADO.....	94
6	CONCLUSIONES	103
6.1	CONCLUSIONES.....	103
6.2	TRABAJO FUTURO.....	105
7	BIBLIOGRAFÍA	106
ANEXO A.	LEYES Y NORMAS CHILENAS.....	108
7.1	DECRETO S/N TEMUCO [10]	108
ANEXO B.	TEOREMAS Y LEYES MATEMÁTICOS.....	108
7.2	LEY DE GAY-LUSSAC.....	108
ANEXO C.	FICHA TÉCNICA EQUIPOS	109
7.3	FLUKE 376 FC	109
7.4	METREL MI 2883.....	109
7.5	HIGRÓMETRO SMART SENSOR.....	110
ANEXO D.	CORRECCIÓN GRÁFICAS DE TEMPERATURA	111

Lista de Tablas

Tabla 1. Ficha técnica del laboratorio de secado geosolar.....	23
Tabla 2. Nomenclatura sensores temperatura y humedad del LSG.	24
Tabla 3. Extracto información técnica eléctrica de la Bomba de Calor Geotérmica [4].....	29
Tabla 4. Extracto significado de los códigos del error BCG W02H Series [4].....	31
Tabla 5. Información técnica ventilador del FanCoil usado en el LSG.	35
Tabla 6. Extracto ficha técnica aerotérmico Grammer solar.....	38
Tabla 7. Parámetros técnicos motor extractor aire del sistema techo UCSC [6].	42
Tabla 8. Datos técnicos ventiladores 4" versión 1.	46
Tabla 9. Extracto ficha técnica kit inversor EasySolar 24/1600/40.	51
Tabla 10. Extracto ficha técnica monitor color control GX.....	54
Tabla 11. Extracto ficha técnica panel fotovoltaico (1 unidad).	56
Tabla 12. Extracto ficha técnica batería Eltrik 12V del banco de baterías.	57
Tabla 13. Significado nombres de cada tablero existente en LSG.....	59
Tabla 14. Significado nombres circuitos del selector tablero de distribución.	64
Tabla 15. Descripción posiciones para selector en TD.	65
Tabla 16. Listado protecciones eléctricas en TFyA en LSG.....	66
Tabla 17. Extracto ficha técnica de interruptores automáticos existentes en tablero DC del LSG....	68
Tabla 18. Corrientes de entrada, batería y salida del inversor con la BCG funcionando (con compresor).....	84
Tabla 19. Potencias cargas complementarias BCG y techo aerotérmico.....	87
Tabla 20. Registro salida de la corriente para distintos casos de carga desde el inversor.	91
Tabla 21. Demanda de la batería en distinto caso de cargas.	91
Tabla 22. Resumen consumo potencia cargas existente en sala secado.....	93
Tabla 23. Parámetro para caracterización del clima entre el 1 al 8 de diciembre 2022, en los cuales se realizaron las pruebas de secado [9].....	96
Tabla 24. Resumen de los pesajes del secado de las muestras saco interior y saco exterior.	100
Tabla 25. Muestras de secado en distintos tipos de maderas de muestras a pequeña escala.	101

Lista de Figura

Fig. 1. Ejemplo de Cámara de secado madera nivel industrial. a) Exterior. b) Interior con sistema de extracción de aire. Altertec.....	16
Fig. 2. Diagrama uso fuentes energías primaria para ser transformadas en energías secundarias en forma de calor. Elaboración propia.	21
Fig. 3. Ubicación laboratorio de secador Geosolar dentro de la universidad UCSC, Biobío, Chile. Elaboración propia.	22
Fig. 4. Vista exterior del edificio laboratorio de secado Geosolar (LSG). Elaboración propia.	22
Fig. 5. Vista transversal laboratorio de secado Geosolar (LSG), la sala de máquinas y la cámara de secado [1].	23
Fig. 6. Vista principal del sistema de monitoreo de temperatura y humedad del programa registro datos Easy Modbus Viewer. Elaboración propia.....	25
Fig. 7. Comportamiento de la temperatura del suelo con respecto a la profundidad [2].	26
Fig. 8. Circuito BCG ilustrativa de las etapas y partes que lo compone [3].	29
Fig. 9. Interior BCG, 1) Intercambiador calor Gas-estanque acumulador, 2) Intercambiador calor sub suelo-Gas, 3) Descompresor gas, 4) Compresor gas, 5) Panel eléctrico. Elaboración propia.	30
Fig. 10. Imagen termográfica del Manifold del intercambiador de calor desde la tierra a la BCG con temperatura muy bajas. Elaboración propia.....	32
Fig. 11. Intercambiadores de calor existente del LSG. A) Intercambiador de calor tipo horizontal en serie. B) intercambiador de calor tipo Slinky horizontal. C) intercambiador de calor tipo Slinky vertical. D) Instalación y distribución [1].	33
Fig. 12. Diagrama lineal de los tres tipos de intercambiadores de calor horizontal y los Slinky [1]. Elaboración propia.	34
Fig. 13. Intercambiador de calor de fluidos de cobre, ubicada dentro de la BCG y parte del circuito de tuberías desde el suelo. [4]	35
Fig. 14. FanCoil de la BCG instalada en la sala de secado. a) Serpentín de tubería PEX. b) Ventilador eléctrico en la entrada del aire. Elaboración propia.	36
Fig. 15. Colector de aire Grammer. Flujo de aire en proceso de elevación de temperatura [5].....	37
Fig. 16. A) Vista aérea del aerotérmico Grammer. Izquierda. B) Vista interior Grammer salida aire caliente a cámara secado. Elaboración propia.....	38

Fig. 17. Diagrama conexiones eléctrica TwinsSolar. En rojo el accesorio termostato que no viene incluido. [5].....	39
Fig. 18. Estado conexión termostato. a) Estado con sobrecalentamiento. b) Forma original. Elaboración propia.	40
Fig. 19. Filtro de aire entrada circuito aire Grammer. Elaboración propia.	40
Fig. 20. Vista superior aerotérmico UCSC delimitado con línea roja. Elaboración propia.	41
Fig. 21. Entrada del aire a la cámara del aerotérmico señalado con el recuadro rojo. Elaboración propia.....	42
Fig. 22. Ventilador centrífugo aire del sistema techo solar UCSC. Elaboración propia.....	43
Fig. 23. Temperatura ambiente del motor centrífugo a) Imagen real de la toma. b) Imagen térmica del ventilador. Elaboración propia.	44
Fig. 24. Imagen térmica del ventilador a temperatura de operación. a) Vista del costado aletas de ventilación. b) Vista trasera ventilación motor. Elaboración propia.	45
Fig. 25. a) Ubicación del fusible térmico dentro del motor. b) Fusible térmico tipo axial, 250V 10A de 110°C. Elaboración propia.	46
Fig. 26. Esquema del sistema fotovoltaico existente en el LSG. Elaboración propia.....	47
Fig. 27. Inversor Victron Energy modelo EasySolar 24/1600/40 instalados en el LSG. Elaboración propia.....	48
Fig. 28. Controlador de carga Smart MPPT Solar de 100 V y 50A. Elaboración propia.	49
Fig. 29. Distribución y protecciones eléctricas de las cargas AC y red eléctrica a la entrada. Elaboración propia.	50
Fig. 30. Diagrama distribución elementos externos complementario a inversor Victron Energy EasyPlus. [7].....	50
Fig. 31. Conexión de inversores en modo trifásico [8].	52
Fig. 32. Conexión inversores en modo monofásico [8].	53
Fig. 33.a) Vista frontal del monitor Color Control GX. b) Vista posterior de los conectores [8].	55
Fig. 34. Paneles fotovoltaicos instalados en el laboratorio de secado Geosolar. Elaboración propia.	56
Fig. 35. Formato conexionado banco batería inversor. Elaboración propia.	57
Fig. 36. Banco de batería instalado en el LSG. Elaboración propia.	58
Fig. 37. Diagrama ilustrativo de la distribución de los tableros del LSG. TG: Tablero general. TD: Tablero distribución. TDC: Tablero corriente continua. TFyA: Tablero fuerza y alumbrado red trifásica 400Vac. Elaboración propia.	60

Fig. 38. Vista aérea línea eléctrica desde el tablero del edificio de energías hasta el LSG. Elaboración propia.....	61
Fig. 39. a) Vista exterior tablero TGDFACyUE edificio de energías. b) Interruptor automático del alimentador hacia el LSG. Elaboración propia.	62
Fig. 40. a) Vista externa del tablero eléctrico general del LSG. b) Protección principal de 3 polos (1) y protección para el suministro del tablero TD 4 polos (2). Elaboración propia.	63
Fig. 41. a) Vista principal del tablero de distribución (TD). b) Interior del TD (1) con el interruptor automático principal y (2) Regleta conexiones inversor fotovoltaico. Elaboración propia.	64
Fig. 42. Regleta de conexiones inferior de conductores de los inversores. Elaboración propia.	65
Fig. 43. Tablero TFyA en LSG. a) Vista exterior. b) Vista interior en ensayos eléctricos. Elaboración propia.....	67
Fig. 44. Vista interior tablero DC. 1) interruptor automático banco de baterías, 2) Interruptores automáticos de paneles fotovoltaicos. Elaboración propia.	68
Fig. 45. Conexión inversores en serie al Color Control GX por cable de red . [8].....	69
Fig. 46. a) Adaptador <i>VE.Bus a USB Interface MK3-USB</i> . b) Cable red (amarillo) comunicación con inversores. [8] y Elaboración propia.	70
Fig. 47. Programa ya reconociendo los tres inversores. Elaboración propia.	71
Fig. 48. Ventana selección modo de la salida de los inversores. a) Opción trifásico. b) Opción monofásico. Elaboración propia.....	71
Fig. 49. Selección de la salida modo monofásico con los tres inversores. Elaboración propia.	72
Fig. 50, Configuración para modo trifásico de los tres inversores. Elaboración propia.	73
Fig. 51. Opción <i>Send Configuration</i> sirve para cargar la nueva configuración a los equipos. Elaboración propia.	73
Fig. 52. Vista inicial programa Victron Connect en computadora. Elaboración propia.	74
Fig. 53. Apartado de configuración conexión y desconexión red eléctrica.	75
Fig. 54. Ajuste de parámetros para carga de batería. a) Parámetros de la función de cargador. b) Establecer el SOC mínimo de descarga de la batería y conectar red eléctrica. Elaboración propia. .	77
Fig. 55. Gráficas de las etapas en la carga de banco de baterías.	79
Fig. 56. Información en tiempo real que entrega el panel Color Control GX. Elaboración propia. ..	80
Fig. 57. Cable para datos para enviar información de estado de carga al ColorControl GX. Elaboración propia.....	80

Fig. 58. Gráficas inicio y partida de la BCG de corriente, voltaje y potencia fase L1.a) Corriente en fase L1.b) Tensión en fase L1. c) Potencia Activa en fase L1. Elaboración propia.	82
Fig. 59. Gráfica de la partida de BCG. Curva de corriente de fase L1. Elaboración propia.	83
Fig. 60. Curvas de corriente, tensión y potencia activa, cambio de suministro de la BCG de la red a sistema del inversor en recuadro rojo. a) Corriente partida BGC fase L1. b) Tensión en partida BGC fase L1. c) Potencia activa en partida BGC fase L1.....	85
Fig. 61. Potencia salida desequilibrada de inversor en modo trifásico.	88
Fig. 62. Gráfica de las potencias de entrada (red eléctrica) y salida de los inversores en modo monofásico.	90
Fig. 63. Gráfica del estado de carga (SOC) del banco de batería durante operación.....	92
Fig. 64. Muestras aserrín para ensayo de secado. a) En contactor con el piso. b) Sobre lamina metal.	95
Fig. 65. Muestras aserrín para ensayo de secado. a) Bandeja plástico frutas. b) Saco plástico.	96
Fig. 66. Gráfica de la humedad del centro de las 4 muestras en la sala de secado durante los 8 días.	97
Fig. 67. Gráfica de comparación del porcentaje de la humedad del secado de los sacos interior y exterior.	99
Fig. 68. Gráfica comparativa los pesajes de las muestras sacos de aserrín del exterior e interior. ...	100
Fig. 69. Gráfica temperatura con el eje x en horas y minutos uso comando datetick de Matlab.....	111
Fig. 70. Gráficas superior comparación señal original (azul) vs señal filtrada. Inferior señal filtrada.	112

Abreviaciones

Mayúsculas

A	: Amperes.
ACC	: Amperes en corriente continua.
BCG	: Bomba de Calor Geotérmica.
CA	: Corriente Alterna.
CAS	: Centro de Acopio y Secado.
CC	: Corriente Continua.
°C	: Grados Celsius.
COP	: Coefficient Of Performance (Coeficiente de Rendimiento).
DC	: Corriente Directa.
ERNC	: Energía Renovable No Convencionales.
FCC	: forma canónica controlable.
FIC	: Fondos de Innovación para la Competitividad (asignación regional).
FV	: Fotovoltaico.
GEI	: Gases de Efecto Invernadero.
Hz	: Hertz (Hercios).
IC	: Intercambiador de Calor.
K	: Grados Kelvin.
LSG	: Laboratório de Secado Geosolar.
MP	: Material particulado.
MPPT	: Maximum Power Point Tracking.
S	: Segundos.
TD	: Tablero de Distribución.
TG	: Tablero General.
TFA	: Tablero de Fuerza y Alumbrado.
UCSC	: Universidad Católica de la Santísima Concepción.
V	: Voltaje.
Vcc	: Voltaje Continuo.
Vrms	: Voltaje valor eficaz
VRM	: Victron Remote Manangement.
SEC	: Superintendencia de Electricidad y Combustible.
SOC	: State of Charge, estado de carga en baterías.

Minúsculas

h	: Horas.
mm	: Milímetros.
uds	: Unidades.
kg	: Kilogramo.
kw	: Kilo Watts.
mm	: Milímetros.
m ²	: Volumen Metros cuadrados.
m ³	: Volumen Metros cúbicos.
w/(m ² °C)	: Coeficiente de transferencia de calor, Watt por metros cubico-grados Celsius.
w/mK	: Comparación de la conductividad térmica, Watt por metro-Kelvin

1 Introducción

1.1 Introducción General

En Chile, el consumo de leña está concentrado mayoritariamente en el sector residencial, que es responsable del 98,47% [1] del consumo anual de leña utilizado en calefacción en hogares y que va en aumento. Este fenómeno se extiende desde el sur de la VI región hasta la XI región, donde casi todas las viviendas utilizan leña como combustible para calefacción. Como resultado, los niveles de contaminación atmosférica son alarmantes y las personas se encuentran expuestas a las emisiones de la lenta que contienen concentraciones de material particulado fino (MP_{2,5}) por encima de los límites saludables establecidos por el Ministerio de Salud. El problema radica en que la leña es un combustible de bajo costo y fácil acceso, por lo que su control y fiscalización al momento de obtenerla es bastante difícil, especialmente en sectores rurales.

El uso de la leña presenta algunos problemas, como la falta de control de su venta y uso, estufas de muy baja eficiencia de combustión y el uso de leña húmeda que agrava la generación de contaminantes para el aire. Para abordar estos problemas, se podría utilizar otro combustible de biomasa, como el pellet de madera, un biocombustible sólido y estandarizado, cuya producción se basa en residuos de madera provenientes, en su mayoría, de empresas procesadoras de madera. Su forma cilíndrica, que permite que sea envasado en distintos formatos y, con el uso de envases impermeables, se asegura que no absorba la humedad, lo que lo hace más eficiente y amigable con el ambiente.

Sin embargo, la fabricación de pellets requiere que la materia prima esté seca, lo cual implica un alto consumo de energía, y en las temporadas de otoño e invierno, el uso de energía eléctrica puede resultar insuficiente. En los sectores rurales, existen diversas barreras que dificultan el cumplimiento de las normas de calidad necesarias para su uso como combustible domiciliario, como la baja confiabilidad y potencia del suministro eléctrico y su elevado costo económico. Por lo tanto, es necesario fomentar el uso de energías verdes, como la energía térmica a través de una bomba de calor geotérmica que aprovecha la energía calórica fija de la tierra, que es casi infinita y renovable. También fomentar el uso de la energía eléctrica a través de fuentes fotovoltaicas. Esta investigación propone una evaluación del secado de madera mediante la combinación de dos sistemas de secado: uno mediante fuentes de calor con una bomba geotérmica y otro mediante un sistema aerotérmico.

1.2 Trabajos Previos

Se realizará una revisión bibliográfica sobre la implementación de sistemas eficientes de secado de madera, que utilicen fuentes de energía renovables no convencionales. El objetivo es evaluar la existencia de estudios previos y obtener información relevante para apoyar la investigación en esta área.

1.2.1 Secado de biomasa

- ♣ A. A. Vallejo. Chávez, “Análisis del potencial geotérmico de tres tipologías de intercambiadores para procesos de secado y climatización”, proyecto de título, Universidad Católica de la Santísima Concepción, noviembre 2021.

En el laboratorio de secado geosolar (LSG) de la UCSC en Concepción, se llevó a cabo una investigación enfocada en la experimentación con bombas de calor geotérmicas y tres tipos de intercambiadores de calor. El objetivo fue determinar la eficiencia de los intercambiadores de calor, teniendo en cuenta su forma y distribución en el terreno. Durante el experimento, se realizaron monitoreos de las condiciones de operación del equipo con el fin de asegurar un óptimo desempeño del sistema geotérmico. Los resultados demostraron que el intercambiador de calor adecuado, en relación a su forma y distribución en la tierra, puede mejorar significativamente la eficiencia del sistema geotérmico utilizado en el secado de madera.

- ♣ S. Doerner Histchfeld. “Proyecto cámara de secado para madera elaborada”, tesis ingeniero, Universidad Austral de Chile, Valdivia, 2009.

La tesis de S. Doerner Histchfeld, "Proyecto cámara de secado para madera elaborada", presenta el diseño y construcción de una cámara de secado para madera, abarcando la selección de materiales y equipos y el control de parámetros de temperatura y humedad durante el proceso de secado. El trabajo busca secar tablas de madera con una humedad inicial del 80% para alcanzar una humedad final del 10%, utilizando temperaturas de hasta 100°C durante el proceso de secado. El trabajo concluye con la evaluación de la eficiencia del sistema construido.

- ♣ M. Gutiérrez, A. Villalón, E. Fresno, C. Hernández, M. Muñoz, “Asesoría de ingeniería de detalles de un Centro de Acopio y Secado (CAS) de leña en Coyhaique”, Evolucionera energía y River consultores, Ministerio de energía, Chile, enero 2016.

Este informe final de proyecto abarca tanto el estudio como la aplicación de técnicas de secado de madera. En la actividad 1 del informe se describen diferentes métodos de secado utilizados para la leña en el galpón CAS, incluyendo el secado con energía solar y el uso de bombas de calor geotérmicas, aunque no combinados. Según el análisis de costos de operación, el método más conveniente resultó ser el secado de leña mediante energía solar, con un costo de \$550/m³.

- ♣ A Arango Jhonson, “Secado de la madera manual”, Centro colombo canadiense de la madera, primera edición, Sena, región Antioquia choco, 1990.

Del presente manual se extraen las definiciones y elementos que componen el proceso de secado de un material vegetal. Una sala de secado de madera es un espacio especialmente diseñado para reducir el contenido de humedad de la madera a un nivel adecuado para su utilización en diversas aplicaciones. Esta sala debe ser hermética y construida con materiales térmicos que minimicen la pérdida de calor a través de las paredes y el techo durante el proceso de secado. Además, es necesario que cuente con una estructura resistente a la corrosión, dado que estará expuesta a la humedad y los ácidos liberados por la madera durante el secado.

El objetivo principal de una sala de secado es controlar el proceso de secado de la madera en cada etapa, garantizando una sequedad constante y uniforme. Para lograrlo, se utilizan sistemas de ventilación y control de humedad y temperatura, que permiten ajustar las condiciones ambientales de acuerdo con el tipo de madera y el grado de humedad inicial.

En conclusión, una sala de secado de madera es un espacio altamente especializado que se emplea para llevar a cabo un proceso de secado uniforme y constante en la madera, con el propósito de reducir su contenido de humedad a un nivel adecuado para su aplicación en distintos usos.



Fig. 1. Ejemplo de Cámara de secado madera nivel industrial. a) Exterior. b) Interior con sistema de extracción de aire. Altertec.

La selección de la fuente de energía para la producción de calor y la elevación de la temperatura del aire es crucial en la elección del tipo de secado a realizar en la cámara. Las temperaturas utilizadas para el secado de la madera varían desde los 40°C hasta más de 100°C, lo que depende del tipo de secado que se va a realizar. En general, las fuentes de energía se dividen en dos grupos básicos:

Fuente de energía primaria: Es aquella fuente de energía básica que no ha sufrido modificaciones desde que se extrajo. Como ejemplo: petróleo crudo, radiación solar, energía geotérmica, etc.

Fuente de energía secundaria: Son productos derivados de las fuentes de energía primaria y que han sufrido transformaciones físicas o químicas para su uso, como el Diesel, Gas licuado, el kerosene, el Coque (carbón), etc.

Para evaporar el agua presente en la madera es necesario aplicar calor. Algunos de los procedimientos más comunes son: vapor de agua en baja y alta presión, quema de desperdicios de madera a través de los gases calientes de la combustión, calefacción eléctrica, aceites térmicos (calentados con combustión de madera) y energías renovables no convencionales (ERNC). La cantidad de energía necesaria del tipo de fuente y del nivel de secado que se requiere, el cual se resume en el volumen del material a secar, su porcentaje de humedad inicial y final y el volumen de la sala de secado.

1.2.2 Discusión

Los tres trabajos abordan el tema del secado de la madera y presentan diferentes enfoques y metodologías. La asesoría de ingeniería de detalles de un Centro de Acopio y Secado (CAS) de leña en Coyhaique realizada por Gutiérrez et al. (2016), propone el uso de diferentes métodos de secado, incluyendo el uso de energía solar y bomba de calor geotérmica, y concluye que el secado mediante energía solar resulta ser la opción más conveniente en términos de costos de operación.

La tesis de Doerner Histchfeld (2009) presenta el diseño y construcción de una cámara de secado para madera elaborada, donde se aborda la selección de materiales y equipos, así como el control de parámetros de temperatura y humedad durante el proceso de secado. El objetivo del trabajo es secar tablas de madera con una humedad inicial cercana al 80%, para alcanzar una humedad final del 10%.

Por último, el proyecto de título de Vallejo Chávez (2021) se enfoca en el análisis del potencial geotérmico de tres tipologías de intercambiadores para procesos de secado y climatización. Se concluye que el intercambiador de tubo y aleta resulta ser la mejor opción para el secado de la madera debido a su alta eficiencia y rendimiento energético.

En resumen, estos trabajos presentan diferentes enfoques y metodologías para el secado de la madera, abordando aspectos técnicos, económicos y energéticos. Estos aportes pueden ser de gran utilidad para el diseño y construcción de sistemas de secado de madera más eficientes y sostenibles.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Caracterizar en forma preliminar el desempeño del laboratorio Geosolar y de sus sistemas en forma empírica integrando la generación de electricidad a partir de un sistema de energía solar fotovoltaica. El trabajo incluye evaluación de secado de biomasa mediante la combinación de sistemas que incluyen una bomba de calor geotérmica y un sistema aerotérmico.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Identificar de los componentes y funcionamiento del secado Geosolar disponible.
- Poner en marcha e incorporar la energía FV al proceso de secado, en base al equipamiento disponible.
- Diseñar ensayos de pruebas en el laboratorio de secado de biomasa y evaluar resultados experimentales de secado de biomasa considerando distintas combinaciones de energía.

1.4 Alcances y Limitaciones

El proyecto se desarrolla en el laboratorio de secado geosolar de la universidad Católica de la Santísima Concepción, sede Concepción. Las instalaciones son relativamente nuevas por lo cual aún se encuentran en ajuste y/o reparaciones de la infraestructura.

La investigación se enfoca exclusivamente en el uso de biomasa derivada de la madera en forma de aserrín molido, proveniente de desechos o subproductos generados por empresas procesadoras de madera.

1.5 Temario y Metodología

En el Capítulo 2, se describe en detalle el laboratorio de secado geosolar que se utilizará para llevar a cabo la investigación del proyecto. Se explican los componentes de su estructura y las razones que justifican su diseño. Además, se analizan y explican las diferentes tecnologías que se utilizan en el laboratorio, destacando el uso de fuentes de energía renovable.

En el Capítulo 3, se describe el sistema eléctrico general del laboratorio, incluyendo el uso de los tableros eléctricos y los ajustes necesarios para que el sistema fotovoltaico funcione según las necesidades del laboratorio.

En el Capítulo 4, se desarrolla cómo se podría integrar el sistema fotovoltaico en el circuito de la bomba de calor geotérmica para generar calor en la sala de secado. Se detallan las modificaciones necesarias para lograr este objetivo, incluyendo los ajustes del sistema eléctrico. Además, se realiza un análisis del comportamiento eléctrico durante el funcionamiento y se describen sus limitaciones.

En el Capítulo 5, se lleva a cabo un ensayo de secado de madera utilizando diferentes formatos de aplicación de las muestras, con el fin de analizar si existe una mejora en la forma de apilar. También se compara el proceso de secado dentro del laboratorio con el proceso al aire libre.

Finalmente, en el Capítulo 6, se presentan las conclusiones obtenidas a través de la investigación y el desarrollo de los capítulos anteriores. Se demuestra que el uso directo del sistema fotovoltaico no es suficiente para suministrar energía a la bomba de calor geotérmica, pero sí es suficiente para abastecer al resto de las cargas. Además, se concluye que la sala de secado logra producir una reducción importante de humedad en las muestras en comparación con la muestra del exterior.

Para el desarrollo de este proyecto, se comenzó investigando el uso del laboratorio como secador y se exploraron diversas tecnologías de fuentes de energía renovable, como la solar y la geotérmica, que ya han sido verificadas. Luego, se planteó cómo combinar estas tecnologías de manera eficiente para generar calor utilizando únicamente fuentes de energía renovable.

Se realizaron diversas investigaciones y experimentos en el laboratorio, utilizando instrumentos de medición eléctrica y térmica, así como sistemas de registro de datos para monitorear la temperatura y el rendimiento del sistema fotovoltaico existente en los equipos. El objetivo era lograr un ensayo de secado con muestras en condiciones iniciales iguales, utilizando mediciones de humedad, peso y tiempo de secado para evaluar la eficiencia del proceso.

2 Laboratorio de secado Geosolar

2.1 Introducción

En esta sección, se detallan los elementos e infraestructura que integran el sistema de secado Geosolar, fundamentales para su correcto funcionamiento. Además, se examina la importancia de las fuentes de energía disponibles, tales como la red eléctrica, los sistemas fotovoltaicos y la energía geotérmica. Siendo energías secundarias, pasarán por diversas etapas para convertirse en una fuente de calor sostenible para la sala de secado, tal como se muestra en la figura 2 y que se detallará más adelante.

Dada la creciente demanda de biomasa seca como materia prima, por ejemplo, para la producción de pellets, el proceso de secado tradicional mediante la exposición al sol resulta insuficiente debido a su lentitud y a las limitaciones que presenta. El material está expuesto a las condiciones climáticas y a la humedad, lo que dificulta el proceso. Para resolver estos problemas, se utilizan hornos acondicionados, aislados del exterior y con circulación de aire para extraer la humedad. Sin embargo, estos hornos requieren fuentes de energía para generar el calor necesario, lo que a menudo implica el uso de combustibles fósiles, generando emisiones contaminantes y aumentando los costos del proceso. Por tanto, resulta necesario desarrollar un proceso que reduzca los costos de operación y la huella de carbono.

En la industria existen varios métodos para lograr un buen secado de la madera, siendo el método más efectivo el uso de una cámara de secado [1] y una fuente de calor que se inyecta dentro de la cámara.

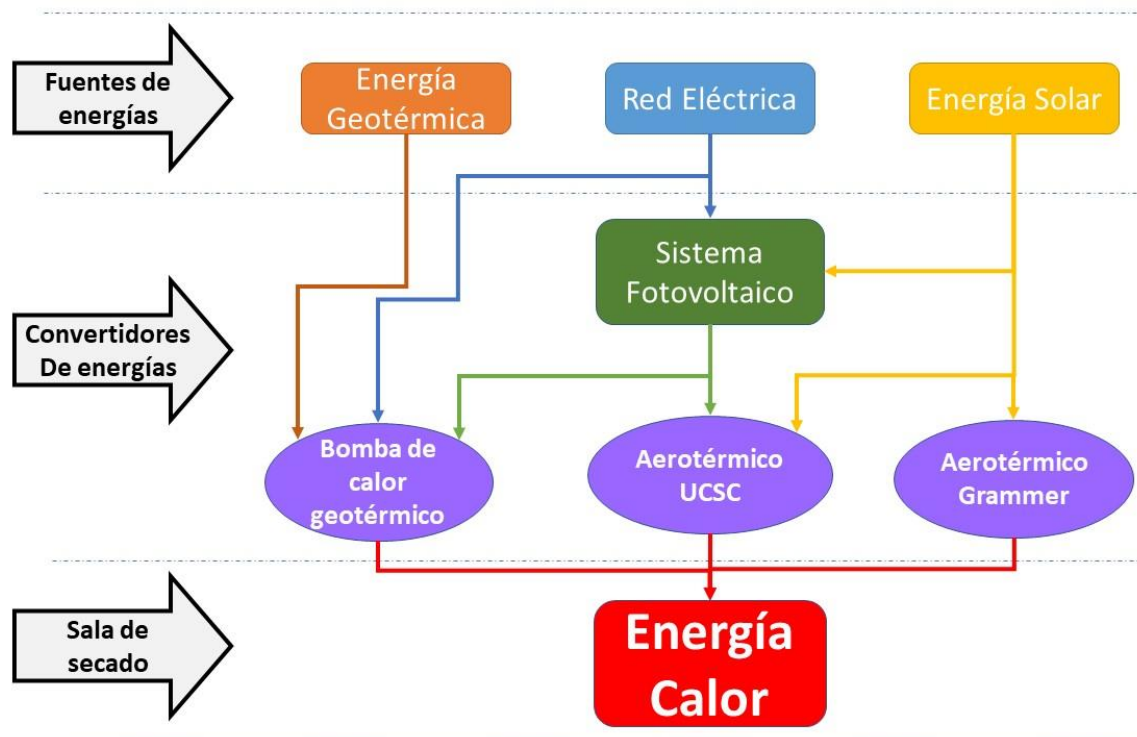


Fig. 2. Diagrama uso fuentes energías primaria para ser transformadas en energías secundarias en forma de calor.

Elaboración propia.

2.2 El edificio laboratorio de secado.

El Laboratorio de Secado Geosolar (LSG) ha sido construido con el apoyo de los Fondos de Innovación para Competitividad (FIC) Biobío pellets, financiados por el gobierno regional de la región Biobío, con código de proyecto BIP 40011065-0: GENERACIÓN DE BIOENERGÍA PARA COMBUSTIÓN A PARTIR DEL MANEJO FORESTAL SUSTENTABLE, y ha sido construido por la empresa de ingeniería INGERO. Se encuentra ubicado en los terrenos de la UCSC sede Concepción, y se trata de una edificación separada de otros edificios, como se puede apreciar en la figura 3. La construcción ha sido enfocada en aprovechar al máximo la radiación solar que incide en el edificio, como se puede observar en la figura 4.



Fig. 3. Ubicación laboratorio de secador Geosolar dentro de la universidad UCSC, Biobío, Chile. Elaboración propia.



Fig. 4. Vista exterior del edificio laboratorio de secado Geosolar (LSG). Elaboración propia.

La instalación consta de dos salas y un solo nivel. En la primera sala se encuentra la entrada principal y se ubican las máquinas (figura 5), como las válvulas, tuberías hidráulicas, bomba de calor geotérmico, sistema fotovoltaico y baterías, tanques de agua e instrumentos de medición. En la segunda sala se encuentra el sistema de secado de biomasa, los sistemas de transferencia de calor, el

sistema de ventilación forzada (FanCoil y techos aerotérmicos) y el sistema de aerotermia autosuficiente (Grammer).

El edificio se construyó con las dimensiones descritas en la tabla 1. Las paredes están compuestas de un material térmico llamado ISOPOL, el cual consiste en un núcleo de poliestireno recubierto con láminas de metal y pintura altamente resistente. Este material posee un coeficiente de conductividad térmica de $0.0384\text{W/m}^{\circ}\text{C}$, lo que significa que tiene una baja tasa de transferencia de calor y permite mantener una temperatura constante en el interior de la cámara. Esto aumenta la eficiencia del edificio y reduce significativamente los efectos del clima exterior.



Fig. 5. Vista transversal laboratorio de secado Geosolar (LSG), la sala de máquinas y la cámara de secado [1].

Tabla 1. Ficha técnica del laboratorio de secado geosolar.

Tipo	Valor
Dimensiones (ancho x largo x alto medio)	4.3 x 6.2 x 2.5 m
Material muros	ISOPOL 100 mm
Material techo	Vidrio e ISOPOL 100mm
Material piso	Concreto
N.º de salas	2

2.3 Sistema de registro de temperatura.

El laboratorio de secado geosolar cuenta con un sistema de sensores que permite medir la temperatura en todo el sistema geotérmico, así como la humedad en la sala de secado. La mayoría de los sensores se encuentran en las tuberías del sistema BCG, lo que permite registrar la temperatura de los líquidos en las diferentes etapas del proceso, en la sala de secado, para medir el porcentaje de humedad y la temperatura de las fuentes de calor. Los datos son registrados por el software Easy Modbus Viewer® (Figura 6), el cual muestra gráficas en tiempo real y recopila los datos en un archivo de tipo "xlsx". A continuación, se presenta un resumen de las abreviaturas de los sensores utilizados en el programa y su descripción vista en la tabla 2. Estas abreviaturas también se encuentran etiquetadas en los sensores del laboratorio.

Tabla 2. Nomenclatura sensores temperatura y humedad del LSG.

Nombre	Descripción
TT1	Temperatura ambiente exterior.
TT2	Temperatura sub suelo tierra (Slinky).
TT3	Temperatura entrada colector Slinky (Hacia la tierra).
TT4	Temperatura salida colector Slinky (Hacia el laboratorio).
TT5	Temperatura estanque acumulador.
TT6	Temperatura salida agua hacia FanCoil.
TT7	Temperatura colector salida estanque acumulador.
TT8	Temperatura agua piso radiante sala secado.
TT9	Temperatura colector entrada estanque acumulador.
TT10	Temperatura aire Aerotérmico UCSC.
TT11	Temperatura aire Aerotérmico Grammer.
TT12	Temperatura ambiente sala secado.
RH(13)	Sensor humedad ambiente sala secado.

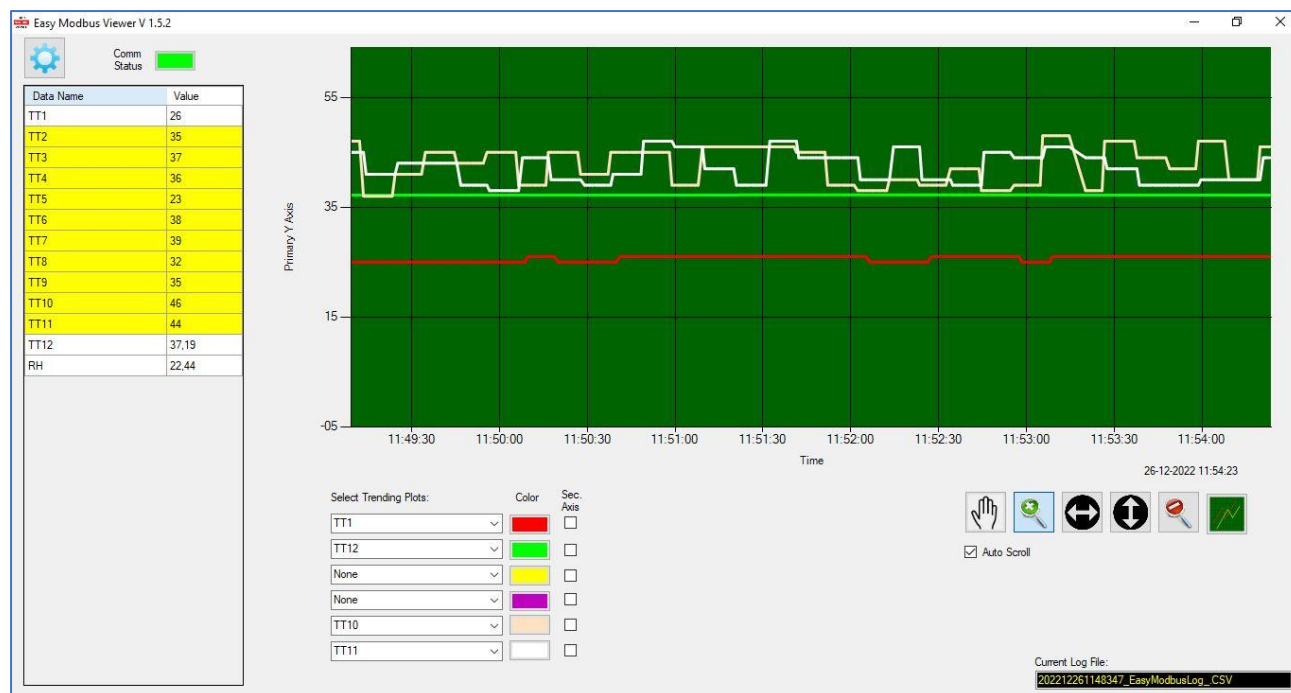


Fig. 6. Vista principal del sistema de monitoreo de temperatura y humedad del programa registro datos Easy Modbus Viewer. Elaboración propia.

2.4 Sistema de secado con Bomba de calor geotérmica.

La bomba de calor geotérmica (BCG) es un sistema que aprovecha la energía calórica presente en la tierra para calentar o enfriar edificios de forma eficiente. Para ello, se perforan pozos en el suelo donde se instala un intercambiador de calor. La BCG toma la energía térmica del suelo a través de este intercambiador y la distribuye al sistema de climatización del edificio. Aunque la BCG consume energía eléctrica para impulsar las bombas de agua y el compresor, su principal fuente de calor es térmica y renovable.

El funcionamiento del sistema para calefacción se basa en un circuito cerrado de refrigerante de gas que absorbe el calor del suelo a través del intercambiador de calor. Este gas refrigerante es comprimido en un compresor, elevando su temperatura, y se transfiere a otro intercambiador de calor que se encuentra dentro del edificio, permitiendo el intercambio de calor para generar la temperatura deseada. La temperatura del suelo dependiendo de su profundidad es estable e independiente del clima pasando los 10 metros de profundidad a una temperatura cercana a los $10^{\circ}\text{C} \pm 1.5^{\circ}\text{C}$ (figura 7), es aprovechada por la BCG para proporcionar una solución de calefacción y refrigeración eficiente y sostenible.

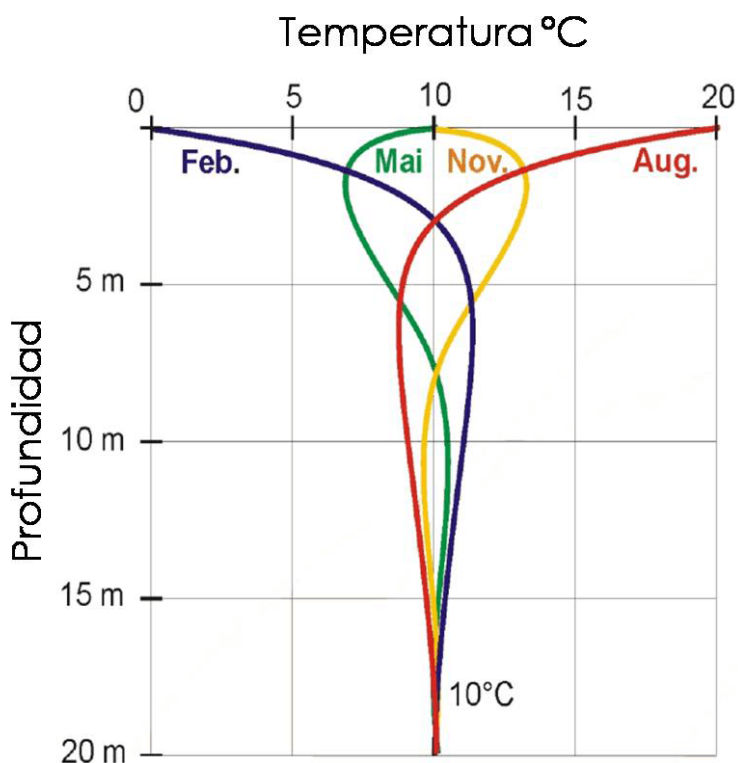


Fig. 7. Comportamiento de la temperatura del suelo con respecto a la profundidad [2].

El sistema de climatización es capaz de regular las temperaturas en un ambiente controlado. Durante el verano, el proceso se invierte y la bomba de calor extrae el calor del aire interior del edificio y lo transfiere al suelo a través de las tuberías del colector, proporcionando aire fresco. Durante el invierno, el agua absorbe el calor del suelo y lo transporta hacia la bomba de calor, la cual utiliza este calor para generar aire caliente que se distribuye por el edificio mediante intercambiadores de calor. De esta manera, la bomba de calor geotérmica (BCG) puede regular la temperatura del ambiente de forma eficiente y sostenible. Una de las mayores ventajas de este sistema es que puede lograr un ahorro de hasta el 80% en los costos asociados a la climatización de espacios. Además, es especialmente rentable tanto en zonas cálidas con demanda de enfriamiento como en zonas frías con demanda de calefacción.

Se puede instalar una BCG en cualquier tipo de suelo, aunque varía la cantidad de área utilizada en el subsuelo y los metros de tubería del sistema intercambiador de calor. En el caso de la instalación al costado del edificio LSG, se utilizaron 300 metros de tubería en total descrita más adelante. Se recomiendan sectores con tierras húmedas o cerca de cuerpos de agua, ya que mejora la transferencia de calor y esto reduce la cantidad de metros de tubería necesarios. En espacios grandes, la instalación resulta más económica ya que no se requieren excavaciones profundas.

La implementación de una bomba de calor geotérmica para generar calor tiene varias ventajas y desventajas.

Entre las ventajas, se encuentran:

- Es una fuente de energía renovable y sostenible, que aprovecha la energía del subsuelo.
- Tiene un bajo costo operativo, ya que no se necesita combustible para generar el calor.
- Es una fuente de energía constante y estable, no depende de factores climáticos externos.
- Puede ser utilizada para generar calefacción y agua caliente sanitaria en viviendas y edificios.
- Tiene un bajo impacto ambiental y no emite gases de efecto invernadero ni contaminantes atmosféricos.

Entre las desventajas, se encuentran:

- El costo inicial de instalación puede ser elevado.
- Requiere un terreno amplio para la colocación de los captadores geotérmicos.
- El rendimiento de la bomba de calor disminuye en climas extremadamente fríos.
- Puede existir un riesgo de contaminación del agua subterránea.
- Requiere de un mantenimiento periódico y especializado.

Sin embargo, su utilización puede contribuir a una reducción de la dependencia de combustibles fósiles y a una menor emisión de gases de efecto invernadero, lo que la convierte en una opción atractiva desde el punto de vista ambiental y energético.

La eficiencia de una bomba de calor geotérmica se mide en términos de su coeficiente de rendimiento (COP), que es la cantidad de energía térmica que proporciona en relación con la cantidad de energía eléctrica que consume. En general, las bombas de calor geotérmicas tienen un COP entre 3 y 5 [3], lo que significa que proporcionan de 3 a 5 unidades de energía térmica por cada unidad de energía eléctrica que consumen. Caso contrario los sistemas de calefacción y refrigeración convencionales, como los calentadores de gas o los acondicionadores de aire, tienen un COP de alrededor de 1.

La Bomba de Calor Geotérmica (BCG) es un sistema de climatización que utiliza agua desmineralizada y gas para su funcionamiento, similar al de un refrigerador doméstico. Esta máquina térmica emplea compresores de gas, evaporadores y gas refrigerante para lograr su cometido. El proceso de transferencia de calor se basa en el ciclo de Carnot, el cual requiere una entrada de energía para transferir una determinada cantidad de calor de un foco frío a uno caliente, en lo que se conoce como ciclo inverso de Carnot. Asimismo, se aplica la Ley de Gay-Lussac, la cual describe la relación entre la presión y la temperatura de un gas en un volumen constante. En este caso, el compresor aumenta la presión del gas, aumentando su temperatura, mientras que el evaporador reduce la presión, disminuyendo la temperatura del gas.

Se describe el proceso de transferencia de calor desde la tierra hasta la sala de secado, el cual se basa en el circuito ilustrado en la figura 8. En el subsistema A, se captura la energía térmica de la tierra mediante el circuito (1), que contiene un líquido (agua desmineralizada o glicol) que ingresa a la tierra con bajas temperaturas y absorbe el calor de la misma (7), elevando su temperatura. Luego, el líquido regresa al evaporador (intercambiador de calor) izquierdo.

En la etapa B, el líquido transfiere el calor al circuito interno de la BCG, el cual es un circuito cerrado lleno de gas refrigerante. Este gas, al evaporarse a baja presión y temperatura (2), ingresa al compresor, donde se eleva la presión y la temperatura. Posteriormente, el gas pasa al condensador (3), transfiriendo el calor al circuito del sistema C por medio de otro intercambiador de calor y llevando la energía térmica a la sala de secado. Luego, el gas libera calor y pasa a un estado líquido (6) antes de llegar al descompresor, donde se reduce su presión y temperatura. De esta manera, el gas vuelve a su estado gaseoso frío (5), completando el ciclo nuevamente.

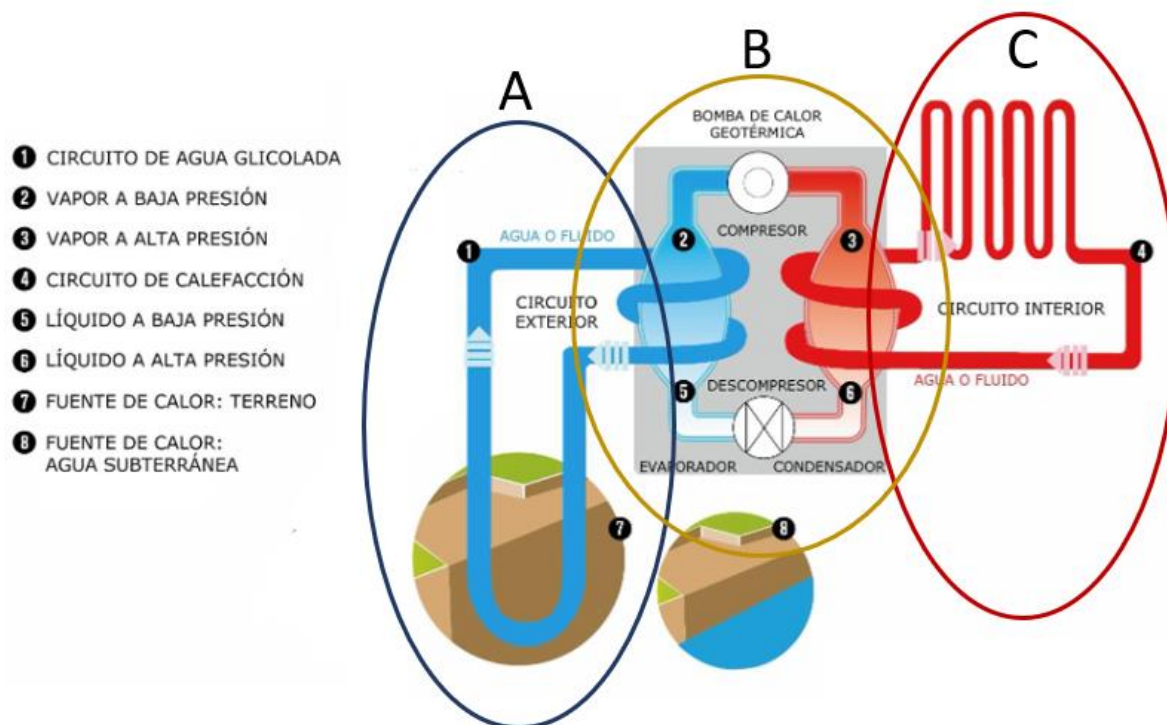


Fig. 8. Circuito BCG ilustrativa de las etapas y partes que lo compone [3].

El edificio LSG cuenta con una bomba de calor de la marca Konner, la cual se utiliza para elevar la temperatura en la sala de secado y para fines de estudio geotérmicos. La bomba de calor consta de tres circuitos de intercambio de calor con la tierra, los cuales se explican más adelante en los intercambiadores de calor. Según los datos técnicos presentados en la tabla 3, la bomba de calor consume 4.2 kW de energía eléctrica y es capaz de producir hasta 20 kW de calor. Esto se traduce en un COP de 4.76 lo que significa que, por cada unidad de energía eléctrica utilizada, se entregan 4.76 unidades de calor, 2.5 de las cuales provienen de la energía geotérmica.

Tabla 3. Extracto información técnica eléctrica de la Bomba de Calor Geotérmica [4].

Tipo	Valor	
Modelo	CSFXRS-20IIA/S	
Tensión nominal	380	V
Corriente nominal	7.8	A
Potencia nominal	4.2	kW
Temperatura agua Nominal	55	°C
Frecuencia	50	Hz
Corriente máxima	10.6	A
Potencia máxima	5.6	kW
Temperatura agua máx.	60	°C

La figura 9 muestra las partes previamente descritas, pero en este caso, en el interior de la BCG instalada en el LSG. Se pueden observar el compresor y el descompresor de las etapas del gas refrigerante del tipo R410A, así como los intercambiadores de calor de fluidos de cobre entre el gas y el agua de los circuitos de tubería.



Fig. 9. Interior BCG, 1) Intercambiador calor Gas-estanque acumulador, 2) Intercambiador calor sub suelo-Gas, 3) Descompresor gas, 4) Compresor gas, 5) Panel eléctrico. Elaboración propia.

2.4.1 Falla operacional en BCG.

La BCG instalada en el LSG en temporada de otoño e invierno ha presentado un problema de funcionamiento con el código de error "E32", el cual se muestra en la tabla 4. Después de aproximadamente 10 minutos de encendida, la máquina emite una alarma y apaga el compresor de la BCG, deteniendo el sistema hasta que se reinicia. Este error se produce cada vez que se enciende la máquina y, según se informa, su frecuencia ha aumentado desde junio de 2022.

Tabla 4. Extracto significado de los códigos del error BCG W02H Series [4].

Error Code	Error Descripción
32	<i>Protection for heat source side temperature too low.</i>

El código de error "E32" se produce porque la protección por temperatura se activa durante el arranque, debido a la baja temperatura del suelo. Esta situación se debe a la limitada capacidad del terreno para transferir calor desde el suelo a las tuberías de refrigeración. Por ejemplo, la conductividad térmica del suelo arcilloso seco se encuentra entre 0,25 y 0,3 [W/mK], mientras que la conductividad térmica del agua es de 0,6 [W/mK]. En otras palabras, el agua tiene una conductividad térmica de 2 a 2,5 veces mayor que la del suelo arcilloso seco. Por lo tanto, en un sistema geotérmico con menor conductividad térmica, se requiere una mayor superficie de intercambio de calor para una determinada potencia térmica. Como consecuencia, se produce una diferencia de temperatura baja entre la entrada y la salida de las tuberías que llegan a la BCG, lo que provoca una reducción de aproximadamente 4°C en la temperatura del refrigerante, tal como se muestra en la figura 10. Esta disminución de temperatura activa la protección para prevenir el congelamiento en el intercambiador de calor de la BCG. Este problema puede estar relacionado con una transferencia de calor subóptima entre el suelo y las tuberías debido a las características del suelo, la distribución de las tuberías enterradas y la humedad presente en el terreno.

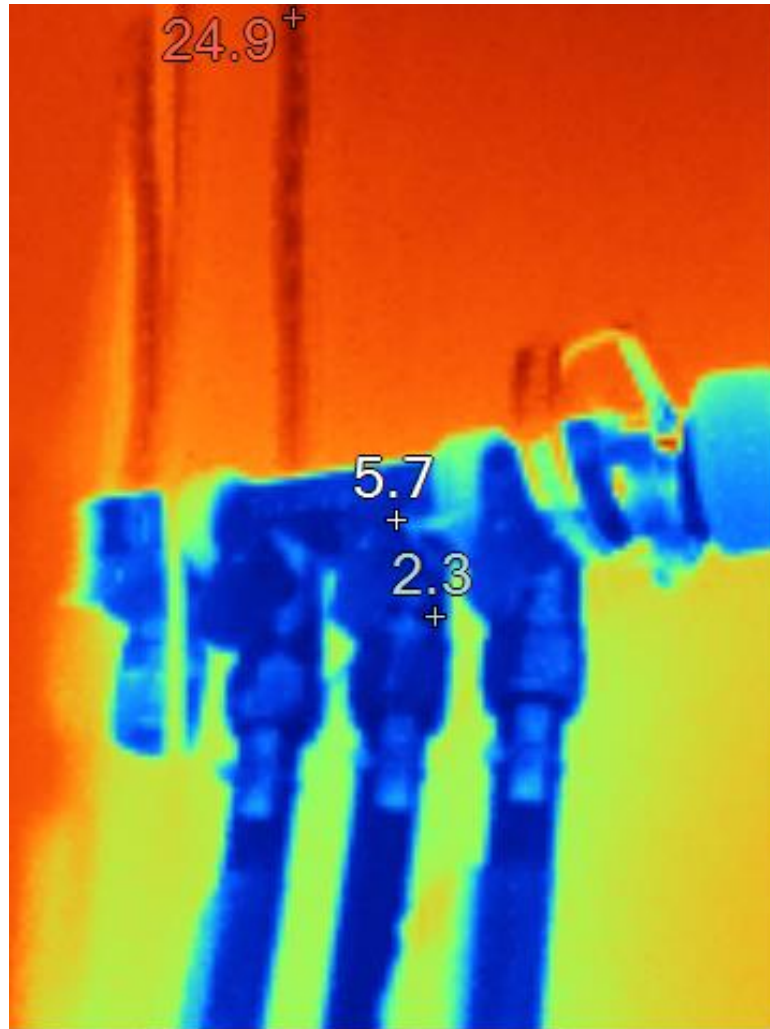


Fig. 10. Imagen termográfica del Manifold¹ del intercambiador de calor desde la tierra a la BCG con temperatura muy bajas. Elaboración propia.

Para solucionar este problema, se recomienda instalar las BCG cerca de una fuente de agua natural, como un lago, río, vertiente o laguna artificial, ya que el agua tiene un alto coeficiente de transferencia de calor de $1000 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$, lo que la convierte en un buen medio para transferir el calor desde el suelo a las tuberías y de estas al agua recirculante de la BCG. Además, se propone instalar una de las tuberías en un cuerpo de agua artificial tipo piscina en la superficie de la tierra, que permita controlar las bajas temperaturas durante las temporadas de escasez de humedad y captar la radiación solar para generar una diferencia de temperatura considerable entre la entrada y salida de las tuberías intercambiadoras de calor.

¹ Manifold es una pieza utilizada en plomería e ingeniería de fluidos para conectar varias cañerías o tuberías en un solo punto de control.

2.4.2 El intercambiador de calor para BCG.

El intercambiador de calor (IC) es esencial en el sistema geotérmico, ya que permite extraer la energía del suelo. Se trata de un circuito cerrado compuesto por tuberías que se encuentran bajo tierra y que transportan un líquido anticongelante para extraer el calor constante del suelo. Se han desarrollado diferentes técnicas de intercambiadores de calor para ajustarse al espacio disponible y al tipo de suelo. En caso de contar con una limitada profundidad de excavación de solo 2 metros, se recomienda la instalación de tres tipos de intercambiadores de baja entalpía: horizontal en serie, tipo Slinky horizontal y vertical, como se observa en la figura 11.

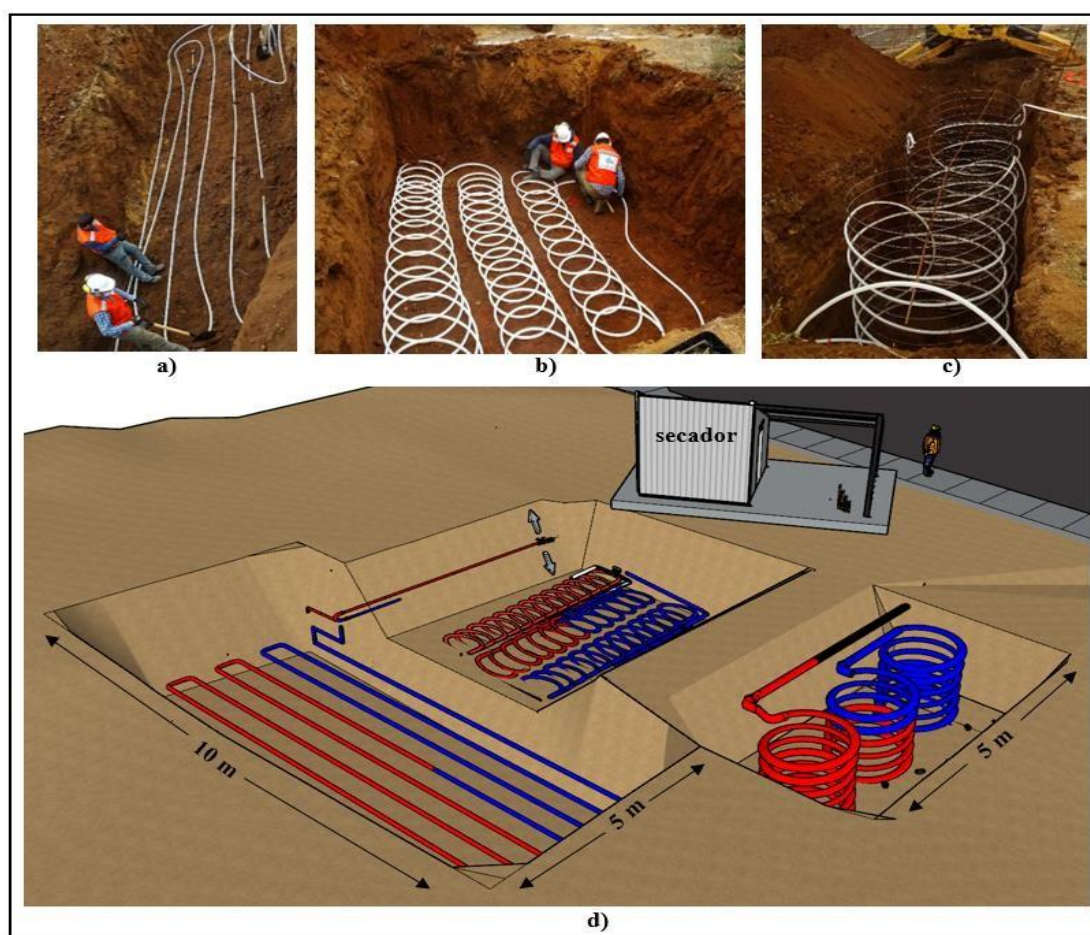


Fig. 11. Intercambiadores de calor existente del LSG. A) Intercambiador de calor tipo horizontal en serie. B) intercambiador de calor tipo Slinky horizontal. C) intercambiador de calor tipo Slinky vertical. D) Instalación y distribución [1].

La instalación de estos tres tipos de intercambiadores de calor tiene como objetivo estudiar y analizar la diferencia de temperatura entre la entrada y salida del circuito, así como evaluar su funcionamiento cuando los tres circuitos operan simultáneamente. Esto permitirá establecer una relación entre la configuración de la instalación y su eficiencia, especialmente en estudios geológicos.

Cada intercambiador de calor, ya sea del tipo Slinky o horizontal, se instalará en un costado del laboratorio, con una profundidad de 2 metros y una longitud de 100 metros cada uno. Se utilizará tubería tipo PEX de 25 mm para la conexión. Puedes visualizar la ubicación de la instalación en la figura 12.

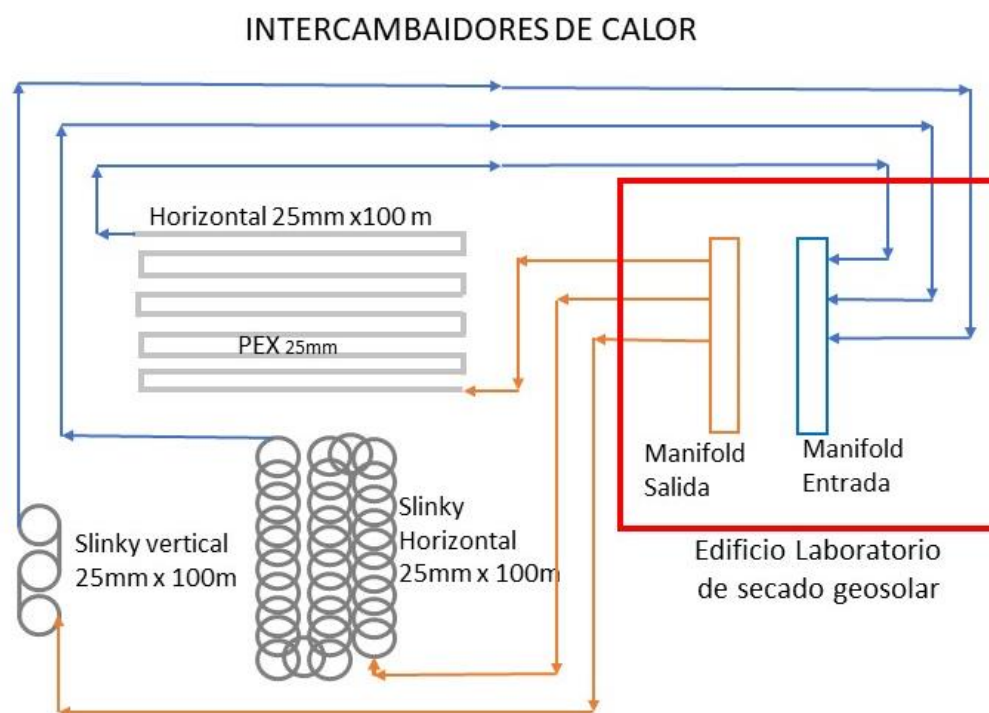


Fig. 12. Diagrama lineal de los tres tipos de intercambiadores de calor horizontal y los Slinky [1]. Elaboración propia.

Como complemento al sistema de intercambiador de calor (IC), es importante mencionar el evaporador, el cual es una pieza fundamental para la compresión y transferencia del calor en el sistema geotérmico. El evaporador utiliza un tipo de intercambio de temperatura conocido como serpentín, el cual permite transferir energía entre la tubería del IC con líquido y el gas refrigerante sin que exista contacto entre ellos. Este tipo de serpentín se utiliza en la bomba de calor geotérmica, tal como se muestra en la figura 13. Consiste en una técnica de intercambio de calor entre dos fluidos que se encuentran separados por un tubo interno de cobre de alta capacidad conductora de calor. El agua circula por el interior del tubo mientras que el gas refrigerante circula por el exterior del tubo en forma

de estrella. Todo esto se encuentra dentro de un tubo liso y metálico que actúa como una segunda cámara y protección.



Fig. 13. Intercambiador de calor de fluidos de cobre, ubicada dentro de la BCG y parte del circuito de tuberías desde el suelo. [4]

2.4.3 Ventilador FanCoil.

El FanCoil es el sistema para entregar el calor desde la BCG a la sala de secado, se compone de un serpentín del FanCoil el cual integra un ventilador y tuberías. Las tuberías PEX tienen un diámetro de 25 mm y una longitud de 28 metros, con un diámetro serpentín de 160 cm para asegurar una óptima transferencia de calor. Por otro lado, el ventilador de la tabla 5 es de alta potencia y resistencia, con un diámetro de 26" y una rejilla metálica para su protección. Cuenta con un aspa de 2 brazos y una perilla de 4 posiciones que permite seleccionar entre 3 velocidades y la opción OFF. El ventilador se coloca en un extremo serpentín del FanCoil y se encuentra rodeado por un cilindro metálico que dirige el flujo máximo de aire hacia el espiral como se muestra en la figura 14.

Tabla 5. Información técnica ventilador del FanCoil usado en el LSG.

Tipo	Valor
Marca	Combi
Modelo	DF650-T
Tensión	220 V

Potencia	187	W
Flujo aire	13.200	m ³ /h
Velocidades	3	

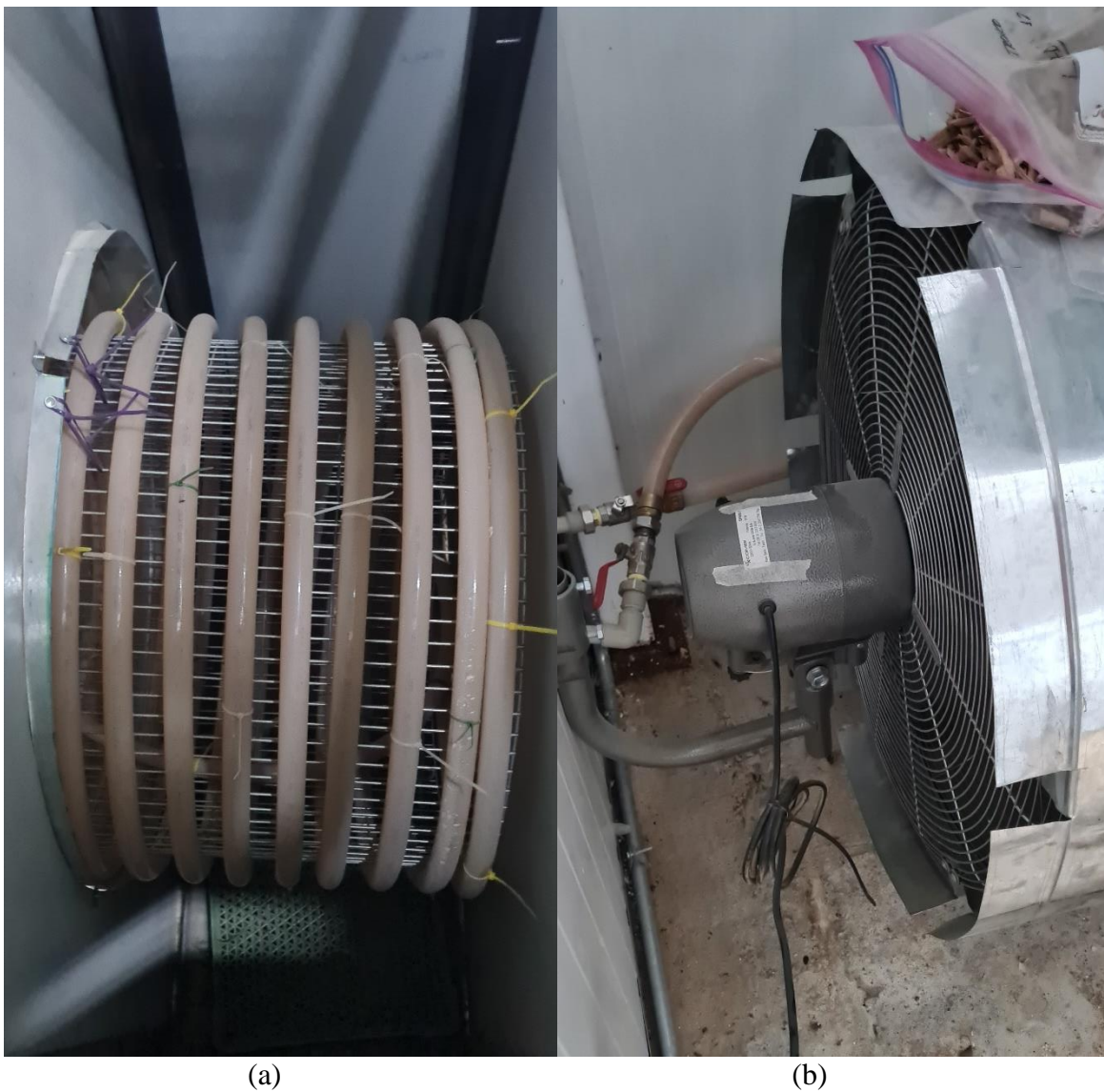


Fig. 14. FanCoil de la BCG instalada en la sala de secado. a) Serpentín de tubería PEX. b) Ventilador eléctrico en la entrada del aire. Elaboración propia.

2.5 Colector aerotérmico Grammer.

El sistema aerotérmico o aire solar consiste en un sistema de calefacción con la única fuente de energía solar, la forma de calentar el aire es dentro de una cámara con una pantalla de vidrio por su parte superior, atrapando en su interior la radiación solar que calienta el aire que circula de un extremo al otro por los conductos, como se aprecia en la figura 15.

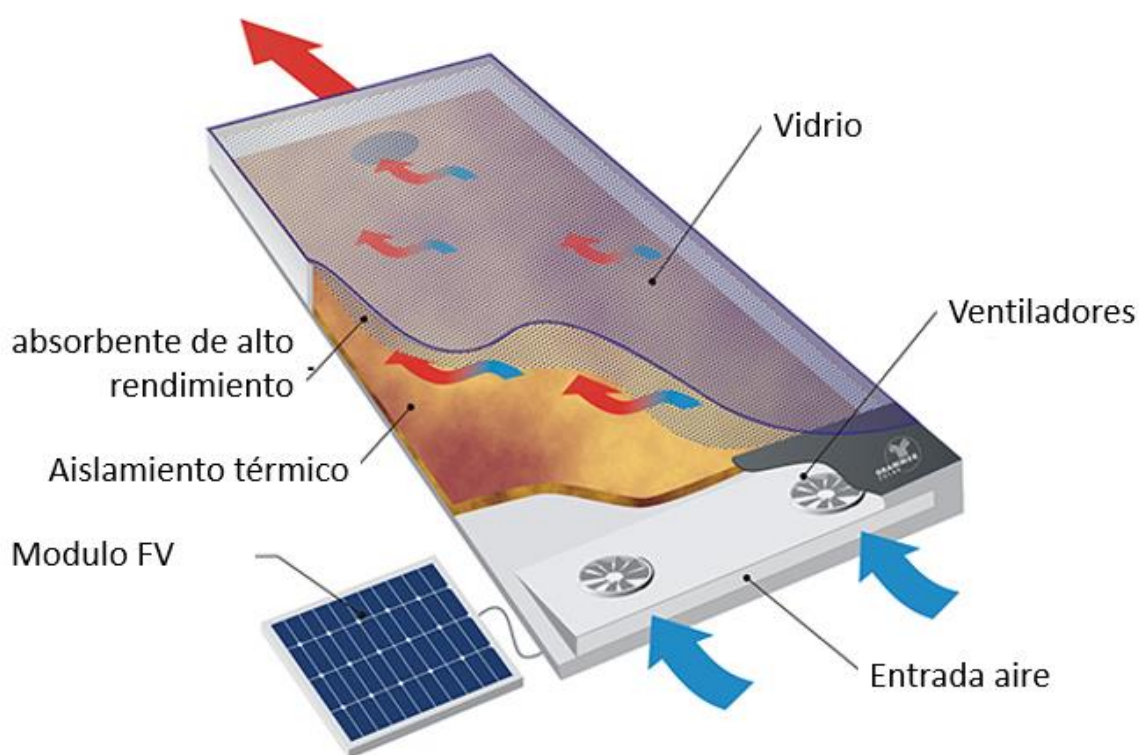


Fig. 15. Colector de aire Grammer. Flujo de aire en proceso de elevación de temperatura [5].

Se utilizan ventiladores ubicados en la parte inferior de la estructura (figura 16-a), debajo del panel fotovoltaico, para forzar el paso del aire por los conductos expuestos al sol a lo largo del equipo, con la salida en el interior de la sala (figura 16-b). Los componentes eléctricos también se encuentran en este lugar, la energía eléctrica se produce mediante un sistema modular fotovoltaico con una potencia máxima de 50Wp, que se utiliza directamente en los ventiladores, lo que permite un control

automático para que solo funcionen cuando haya suficiente radiación solar que se traduce en suficiente calor.

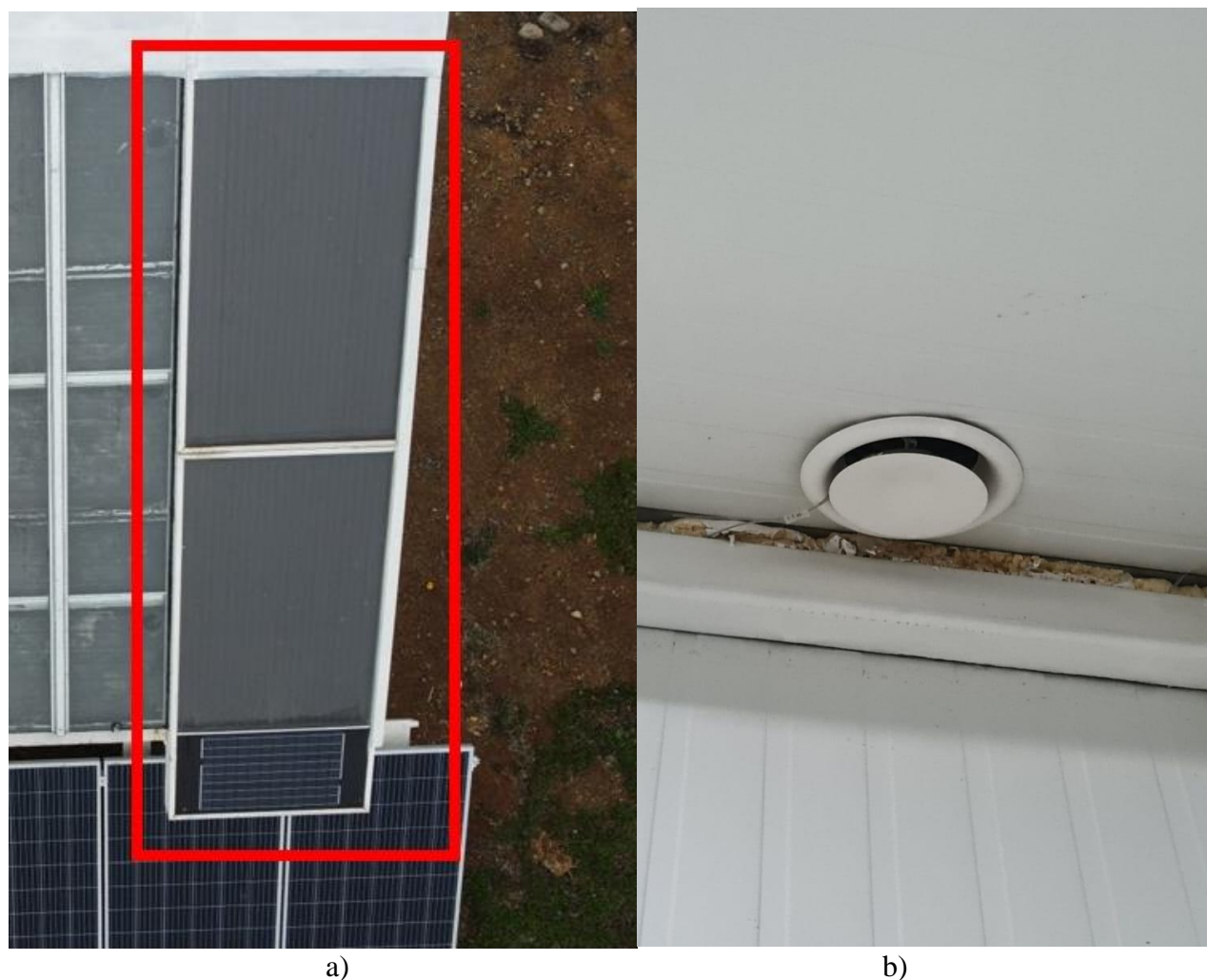


Fig. 16. A) Vista aérea del aerotérmico Grammer. Izquierda. B) Vista interior Grammer salida aire caliente a cámara secado. Elaboración propia.

El panel de vidrio captador de calor tiene una dimensión de 2.2m x 1m siendo el 16.13% del área que abarca del área total de 23m² de techo en el laboratorio. Su colector tiene un diámetro de 160 mm.

Tabla 6. Extracto ficha técnica aerotérmico Grammer solar.

Tipo	Valor	
Modelo	TwinsSolar compacto 4.0	
Dimensiones	4000x1006x138	mm
Capacidad calefacción (Vol.)	60-80	m ²
Caudal recomendado	30-60 m ³ /(hm ²)	m ³ /(hm ²)
Temperatura máxima	150	°C

El sistema Grammer es completamente autónomo y depende al 100% de la energía solar. Durante los primeros ocho días de diciembre, se registró un promedio diario de radiación solar de 4.896 kWh/m² [9]. Teniendo en cuenta que el amanecer se produjo alrededor de las 7:00 horas y el atardecer a las 21:00 horas [9], se tuvieron 14 horas de sol, con un valor máximo de radiación solar de 735 W/m² durante las horas de mayor radiación, que se registraron entre las 12:00 y las 18:00 horas.

En cuanto a la revisión más reciente, llevada a cabo el 13 de abril de 2023, se encontró que el sistema Grammer se encuentra en excelentes condiciones estructurales y no presenta daños. El sistema cuenta con una derivación eléctrica para la opción de utilizar un termostato externo (figura 17), pero en este caso no está instalado, ya que no es necesario controlar la temperatura a niveles bajos (la temperatura promedio de operación de la sala de secado es de 55°C).

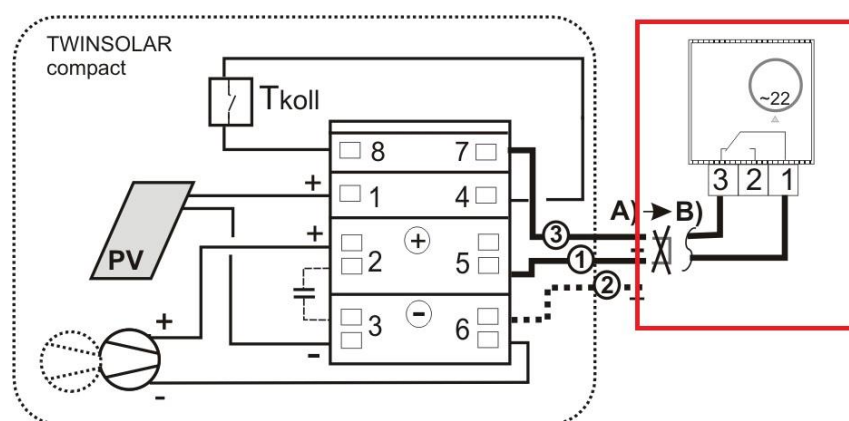


Fig. 17. Diagrama conexiones eléctrica TwinsSolar. En rojo el accesorio termostato que no viene incluido. [5]

El cable eléctrico utilizado para el termostato, que en esta versión no está incluido, está equipado con un puente conectado a una regleta eléctrica de fábrica, como se muestra en la figura 18-a. Durante las primeras etapas del proyecto, se observó un sobrecalentamiento excesivo debido a un mal contacto prolongado en el tiempo (figura 18-b), llegando a un aislamiento eléctrico. Esta situación se solucionó simplemente reparando la aislación de los cables y reemplazando la regleta de unión por una de mayor calidad, asegurando así una mejor conexión eléctrica.

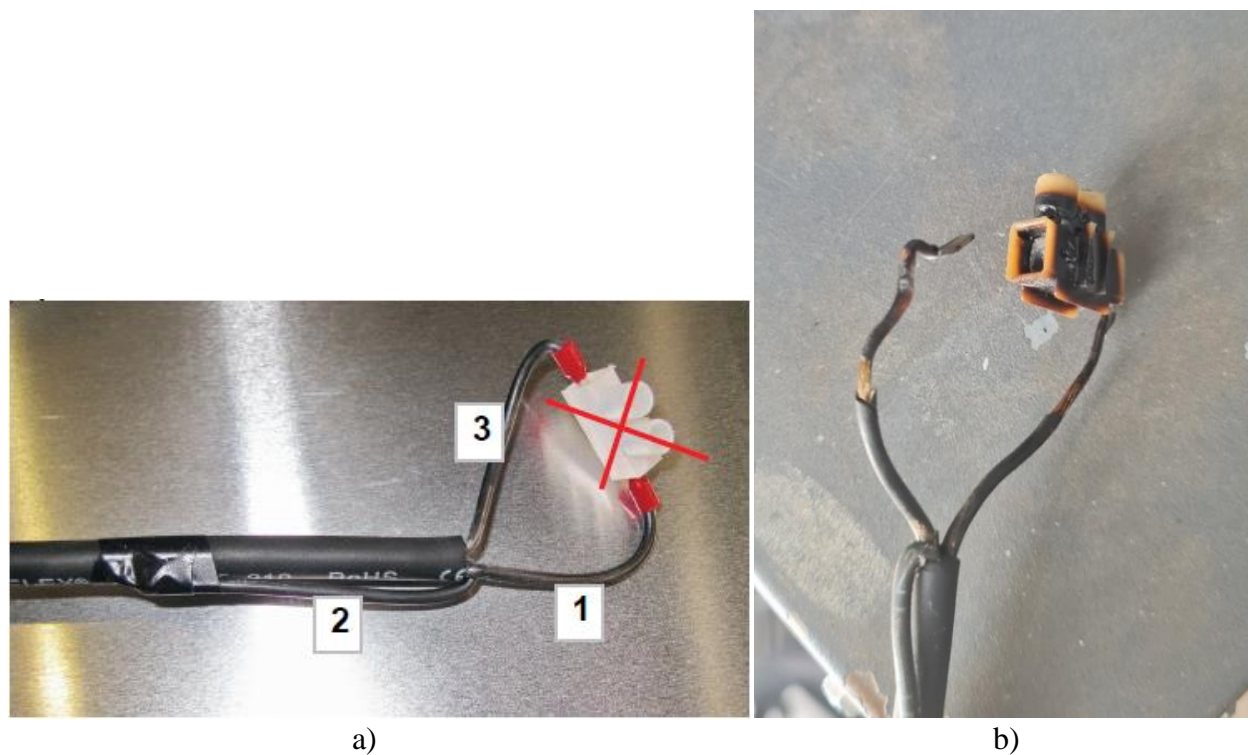


Fig. 18. Estado conexión termostato. a) Estado con sobrecalentamiento. b) Forma original. Elaboración propia.

En la parte externa, cuenta con un filtro de partículas en la entrada del aire como se aprecia en la figura a continuación, el cual requiere limpieza más seguida por la polución de tierra existente en el sector.



Fig. 19. Filtro de aire entrada circuito aire Grammer. Elaboración propia.

2.6 Colector Aerotérmico UCSC.

El Aerotérmico UCSC es una estructura similar al aerotérmico Grammer, diseñado para calentar el aire mediante solar térmica y aumentar la temperatura en la sala de secado. La empresa constructora responsable de su construcción fue Ingero, originaria de Chile. Durante la investigación, se realizaron modificaciones después de un año de funcionamiento, como cambiar el techo de vidrio convencional por uno laminado y abrir una entrada de aire lateral para mejorar el flujo. El techo cubre el 83.87% del área total de la sala de secado, y la cámara de solar térmica está formada por un espacio entre el vidrio (lado externo) y el techo hecho de paneles aislantes Isopol (lado interno). Además, la ventilación forzada utiliza un motor eléctrico alimentado por la red eléctrica.

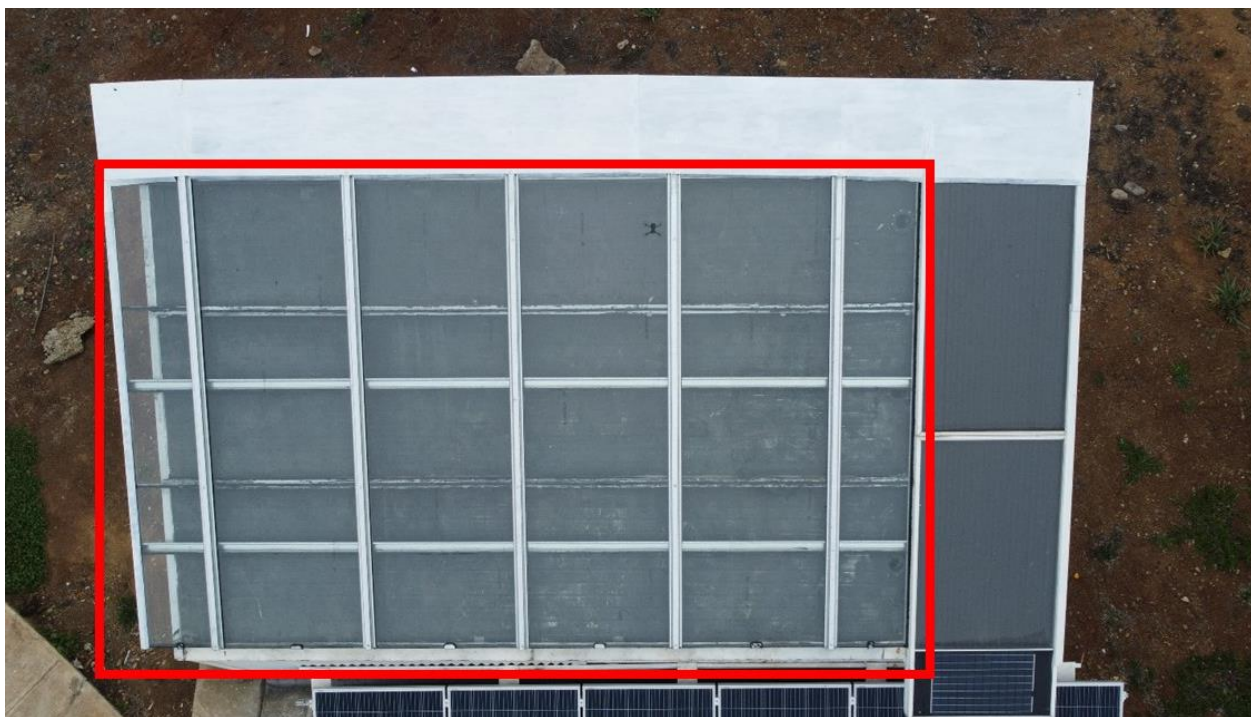


Fig. 20. Vista superior aerotérmico UCSC delimitado con línea roja. Elaboración propia.

El aire ingresa por el canto del techo, en el lado de la entrada principal que se puede observar en la figura 21. El espacio entre el techo aislante y el vidrio está abierto a lo ancho del techo, permitiendo que el aire ingrese a la cámara. Esta cámara está formada por ambas capas, las cuales tienen una separación de 6 cm. El panel aislante originalmente es de color blanco, pero en este caso se cambió a negro para mejorar la retención de la radiación solar.



Fig. 21. Entrada del aire a la cámara del aerotérmico señalado con el recuadro rojo. Elaboración propia.

Al pasar a través del espacio del techo aerotérmico, el aire se calienta de acuerdo a las condiciones climáticas y es absorbido por conducciones que llegan a una tubería conectada a un ventilador centrífugo (figura 22). Este ventilador genera un flujo de aire hacia el interior de la cámara de secado y extrae el aire húmedo al exterior a través de las ventilaciones en la pared. El diámetro de entrada del ventilador es de 14,5 cm y la medida de la salida de aire es de 11,5 x 13,5 cm. El motor de inducción de jaula de ardilla es de corriente alterna, aunque no se especifica la clase de servicio en la placa o en la ficha técnica, por lo que no se puede determinar. Se detallan los parámetros técnicos del ventilador en la tabla 7, incluyendo la longitud del motor y la marca del equipo, si están disponibles.

Tabla 7. Parámetros técnicos motor extractor aire del sistema techo UCSC [6].

Tipo	Valor	
Modelo	CMB/4-180/75	
Tensión	230 V	V
Corriente	1.45 A	A
Potencia	0.18 kW	kW
Velocidad	1400 r.p.m.	Rpm
Caudal máximo	1303	m ³ /h
Factor potencia	0.93	
Clase aislamiento	F	
Dimensiones	Longitud total: 350, Anchura: 145	mm
	Altura: 165, Diámetro del eje: 12.	



Fig. 22. Ventilador centrífugo aire del sistema techo solar UCSC. Elaboración propia.

Con el objetivo de mejorar la eficiencia del sistema de ventilación, se llevó a cabo la sustitución del ventilador existente. El nuevo ventilador seleccionado es de nivel industrial, con una mayor capacidad de rendimiento. Además, opera a una temperatura ambiente promedio inicial de 21.9°C , como se puede observar en la figura 24. Cabe destacar que este nuevo ventilador ha instalado específicamente para operar en modo succión y se ha ubicado estratégicamente en la salida del circuito de aire que pasa a través del techo solar en el interior de la sala de secado.

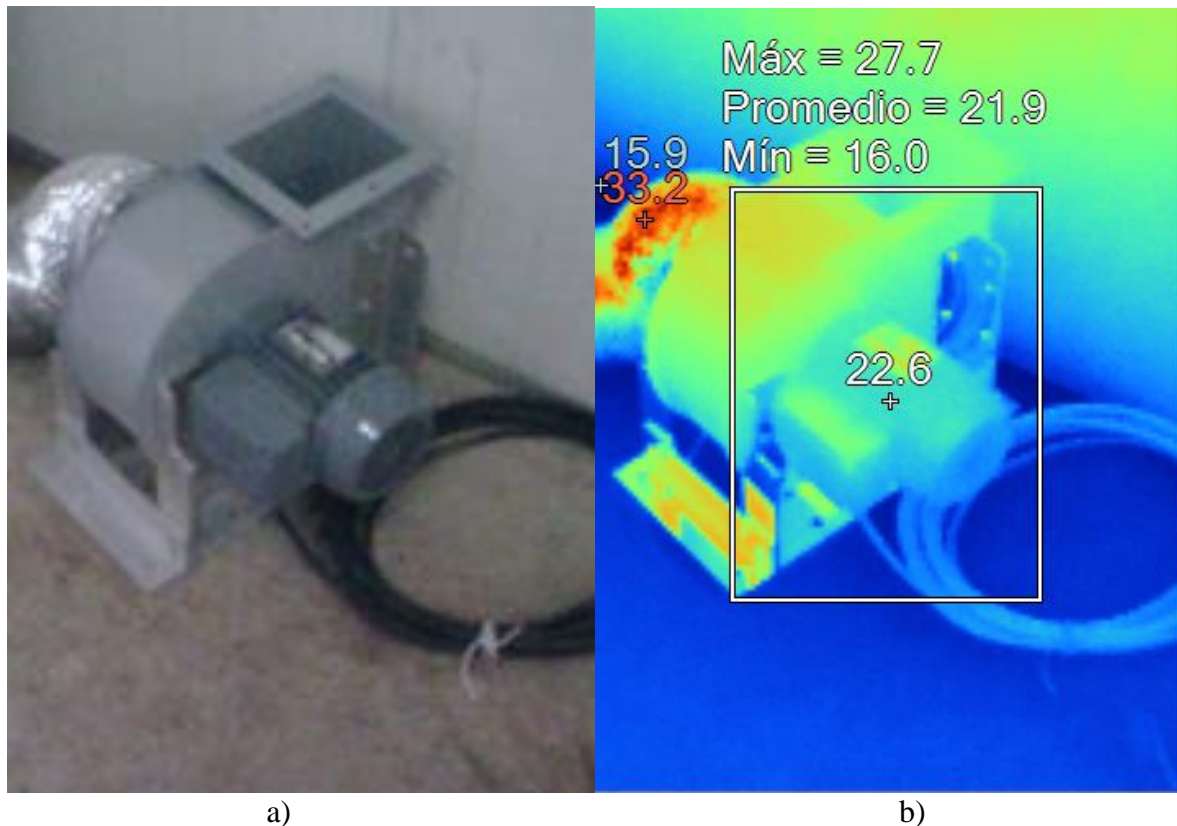


Fig. 23. Temperatura ambiente del motor centrifugo a) Imagen real de la toma. b) Imagen térmica del ventilador.

Elaboración propia.

Cuando la sala de secado alcanza su temperatura de operación de alrededor de 50 °C, se ha observado que la temperatura del cuerpo del motor del ventilador alcanza los 80°C, con un margen de $\pm 5^\circ\text{C}$ mostrada en la imagen termica de la figura 24. Además, la zona de ventilación forzada registra una temperatura de 29.1 °C. Aunque el motor está clasificado como Clase F, lo que significa que puede soportar una temperatura máxima de aislamiento de 150°C, en realidad está operando al 53.3% de su capacidad térmica. Sin embargo, el manual del fabricante del ventilador centrífugo [6] establece una temperatura máxima del aire de 110°C, lo que indica que hay un margen limitado de tolerancia para el motor.

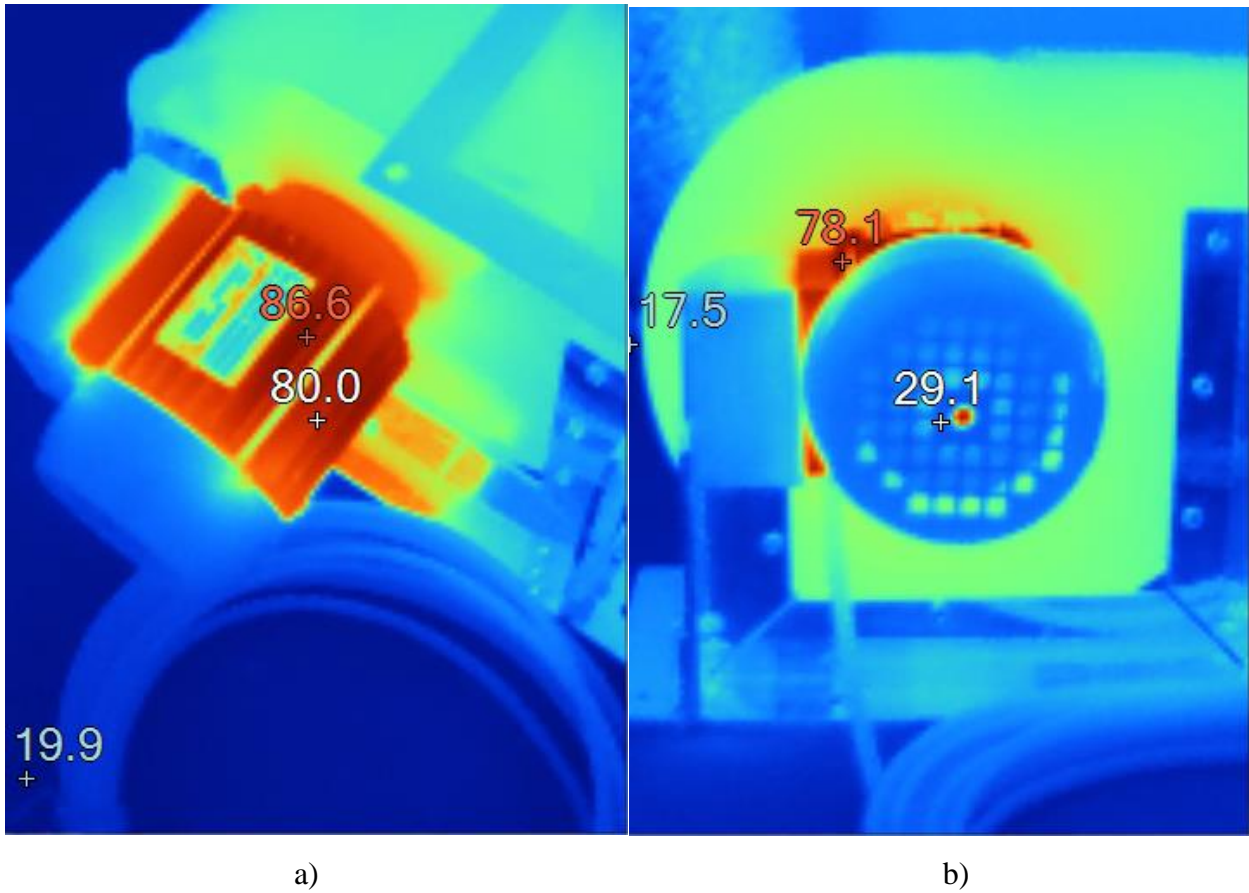


Fig. 24. Imagen térmica del ventilador a temperatura de operación. a) Vista del costado aletas de ventilación. b) Vista trasera ventilación motor. Elaboración propia.

En el inicio de la investigación existían 3 extractores de aire que presentaban fallas, al realizar mediciones de resistividad a las bobinas en los terminales de alimentación se determinó que el circuito se encuentra abierto (NA Ohm), al revisar el interior del motor se aprecia un elemento electrónico que por deducción se trata de un sistema de protección térmico para las bobinas visto en la figura 25.

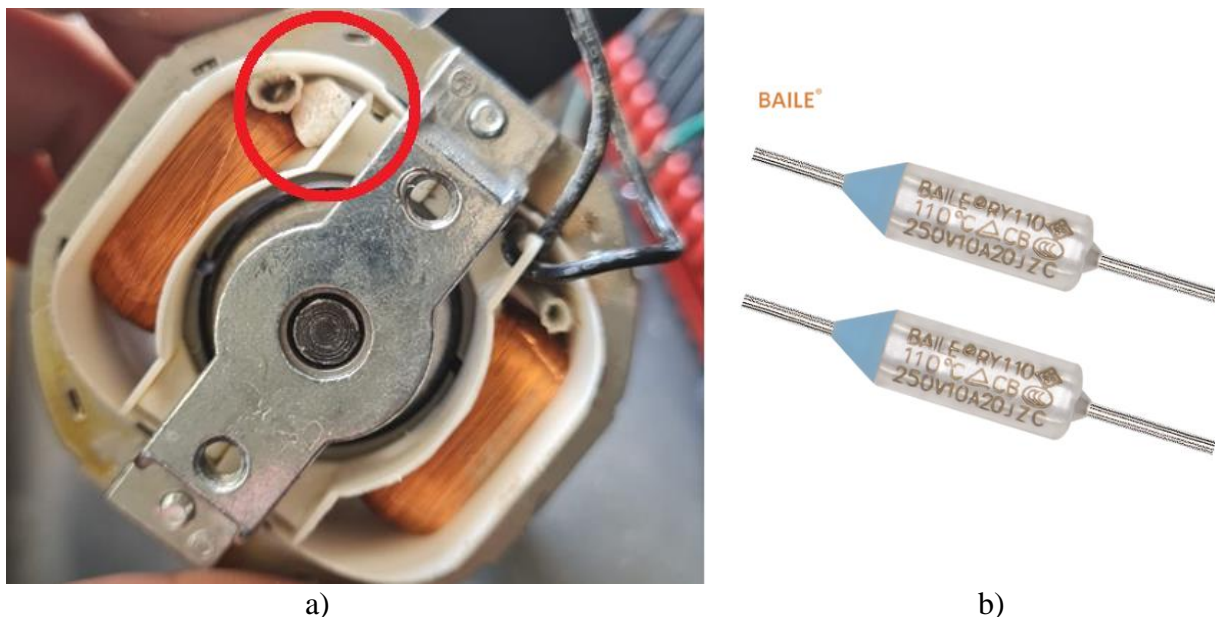


Fig. 25. a) Ubicación del fusible térmico dentro del motor. b) Fusible térmico tipo axial, 250V 10A de 110°C.

Elaboración propia.

Se determina que el motor ha sufrido daños, dejando el circuito abierto. Al realizar una nueva medición en las bobinas antes de la activación de la "protección térmica", se obtuvo un valor de 300Ω , lo cual indica que el motor está en buen estado. Sin embargo, dado que su temperatura máxima es de $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ y las temperaturas en el techo solar pueden superar este límite, la protección térmica ha sido sobrecargada. Como resultado, se concluye que el motor no es adecuado para esta tarea. Lamentablemente, debido a cuestiones de garantía, no es posible desmontar el motor para verificar si se trata de un fusible de protección térmica.

Tabla 8. Datos técnicos ventiladores 4" versión 1.

Tipo	Valor	
Marca	AC INFINITY	
Modelo	AC-RXS4 (S4)	
Tamaño	4	"
Voltaje	115 AC	V
Corriente	0.15	A
Potencia	15	W
Flujo de aire	106	CFM
Ruido	28	dBA
Humedad	35 – 85%	RH
Temperatura Op.	4.5 – 60	$^{\circ}\text{C}$

2.7 Sistema de energía solar fotovoltaico

La instalación fotovoltaica del laboratorio consta de varios componentes esenciales que permiten su funcionamiento. Desde la captación de energía solar hasta la conversión de energía eléctrica, lista para su uso, el sistema pasa por diferentes fases. El sistema se compone de 6 paneles fotovoltaicos, 3 inversores, 4 baterías y un monitor para el control de los inversores. Los componentes están interconectados, como se puede observar en el esquema de la figura 26.

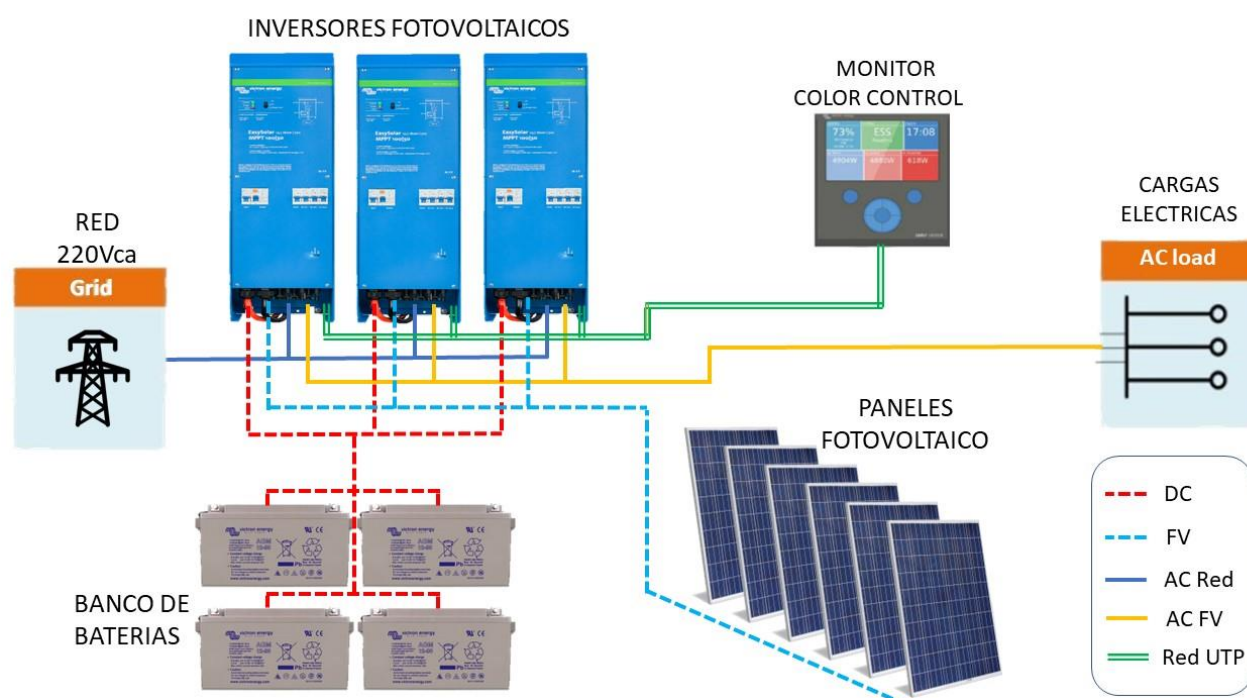


Fig. 26. Esquema del sistema fotovoltaico existente en el LSG. Elaboración propia.

En el esquema anterior se pueden observar dos tipos de energía eléctrica: la continua DC, representada por una línea discontinua; que corresponde a las baterías (DC) y a los paneles fotovoltaicos (FV), y la energía eléctrica alterna (AC); que se refiere a la red eléctrica externa (AC Red) y a la energía producida por los inversores (AC FV). En cuanto al monitor Color Control, su conexión se limita a la comunicación entre los inversores y la extracción de datos en tiempo real para la supervisión y configuración de los mismos. A continuación, se describirán en detalle los componentes mencionados.

2.7.1 Inversores Victron Energy.

El inversor Victron Energy EasySolar 24/1600/40 convierte eficientemente la energía del sol y de las baterías de 24V en energía eléctrica de 230V, permitiendo alimentar dispositivos eléctricos. Además, cuenta con un cargador de baterías integrado que permite la carga desde fuentes externas como paneles solares o generadores. Con una capacidad de 1600VA y una corriente de carga de 40 amperios, este modelo también cuenta con una pantalla LED y puerto USB para monitorear el estado del sistema. Fácil de instalar y diseñar tanto para aplicaciones como estacionarias, este inversor es un equipo robusto y confiable para sistemas de energía renovable. Asimismo, es modular, lo que permite conectar hasta 6 Multis EasySolar para ampliar su capacidad de potencia nominal y es compacto y ligero, lo que reduce el cableado necesario para su instalación como se aprecia en la siguiente figura.



Fig. 27. Inversor Victron Energy modelo EasySolar 24/1600/40 instalados en el LSG. Elaboración propia.

Se describe como un sistema eléctrico inversor fotovoltaico que combina un cargador solar tipo MPPT avanzado, un inversor potente sinusoidal, un conmutador de transferencia y distribuidor tipo CA, todo en un formato compacto, al ser del tipo modular cuenta con una capacidad de conexión hasta 6 Multis EasySolar para el funcionamiento en modo paralelo elevando su capacidad de potencia nominal. Dentro de los componentes que se encuentran en el interior del equipo, se destacan las siguientes partes [7]:

Inversor y cargador: Modelo MultiSolar Compact 24/1600/40, es un inversor de tensión CC $24V_{CC}$ y con una tensión de salida variable 110 a 220 V_{CA} , con capacidad de una potencia de 1600VA y con una corriente CC máxima de 40A. Al ser inversor/cargador comparte los cables de las baterías CC con el controlador de carga solar, teniendo la opción de carga desde la red eléctrica CA o por energía solar fotovoltaica por medio del controlador de carga (MPPT).

Controlador de carga: Modelo SmartSolar MPPT 100/50 permite corrientes hasta 50A y tensiones hasta $100V_{CC}$, al ser tipo MPPT (Maximum Power Point Tracking), permite conectar hasta 3 serie de paneles fotovoltaicos.

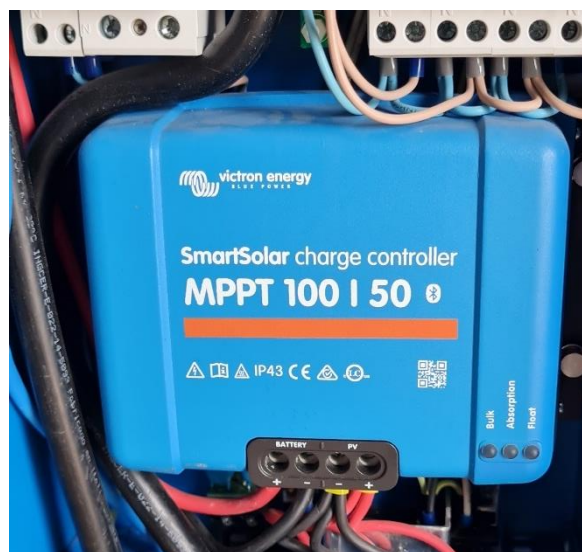


Fig. 28. Controlador de carga Smart MPPT Solar de 100 V y 50A. Elaboración propia.

Distribuidor CA: Distribución de la salida CA del inversor está protegida por un interruptor diferencia de 30 mA/ 16A, derivando a 4 salidas; dos de ellas protegidas cada una por un interruptor térmico de 10 A y las otras dos por 16A. Una de las salidas vista en la figura 29, de 16 A (AC Out 0)

tiene una condición de función, que solo entregara energía si existe tensión de la red eléctrica CA conectada.



Fig. 29. Distribución y protecciones eléctricas de las cargas AC y red eléctrica a la entrada. Elaboración propia.

Se determinó que el equipo es fácil instalación, ya que cuenta con conexiones específicas para cada componente, lo que permite realizar conexiones más seguras y protegidas. Además, su diseño permite una fácil intervención ya que se puede desconectar de manera rápida. La figura 30 muestra que se pueden conectar tres líneas de paneles fotovoltaicos, una línea de baterías, una línea de alimentación de la red eléctrica, cuatro líneas de salida para cargas y, por último, conexiones para datos, como el UTP/VE.Bus para la comunicación entre inversores y monitor, y el VE.Direct para la comunicación del cargador inteligente. Estas conexiones se describirán con más detalle más adelante.

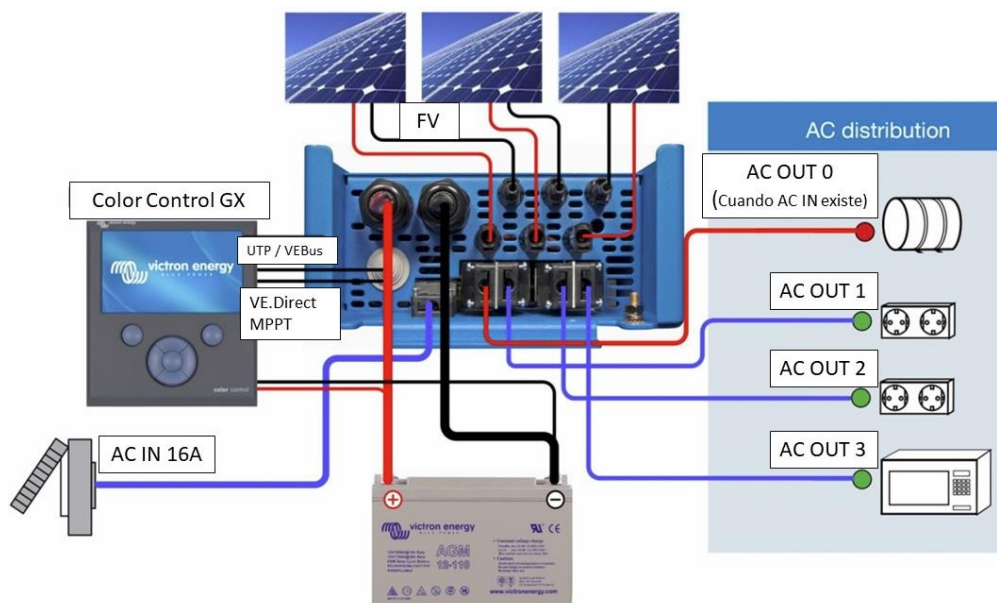


Fig. 30. Diagrama distribución elementos externos complementario a inversor Victron Energy EasyPlus. [7]

En Chile, los equipos de energía de Victron Energy cumplen con las normativas técnicas y legales correspondientes, tales como las siguientes:

- Norma Técnica de Distribución Primaria de la Energía Eléctrica, NCh4/2003.
- Norma Técnica de Distribución Secundaria de la Energía Eléctrica, NCh2369/2016.
- Reglamento de Instalaciones Eléctricas, Decreto Supremo N.º 30/2017 del Ministerio de Energía de Chile.
- Normativa de Seguridad Eléctrica, Resolución Exenta N.º 1566/2018 de la Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC).

Además, los equipos Victron Energy pueden cumplir con otras normativas en función del uso y aplicación específica del producto, como por ejemplo normativas relacionadas con sistemas de energía renovable y regulación de seguridad y medio ambiente en la industria náutica.

Tabla 9. Extracto ficha técnica kit inversor EasySolar 24/1600/40.

Tipo	Valor	
Modelo	EasySolar 24/1600/40	
Tensión de entrada DC	19 - 33	V
Corriente de carga baterías Max	40	A
Tensión salida CA	230 ± 2%	V
Corriente salida Reforzada	16	A
Potencia salida rms	1200(25 °C) 1300(45°C)	W
Potencia salida peak	3000	W
Eficiencia máxima	94	%

Actualmente, en el laboratorio hay tres equipos idénticos instalados que funcionan como inversores/cargadores y tienen una mayor eficiencia para cargar las baterías mientras el grupo suministra energía a la carga. Además, estos equipos tienen la capacidad de comunicarse entre sí a través de un cable Ethernet de red (UTP/VE.Bus), lo que les permite trabajar de manera coordinada y sincronizada según el modo seleccionado mediante el protocolo VE.Bus. Victron Energy ofrece programas informáticos complementarios que permiten asignar un orden a los inversores según el tipo de salida de energía requerida, ya sea trifásica o monofásica reforzada.

2.7.2 Modos de operación de los inversores.

Configuración trifásica: Programación para la coordinación entre inversor para genera una fase y producir el desfase en $\pm 120^\circ$ entre fases, la tensión es ajustable siendo para Chile $380V_{LL}$. La red eléctrica de entrada será trifásica con cada fase a cada inversor y su salida de la misma forma, el neutro de los tres inversores será en común.

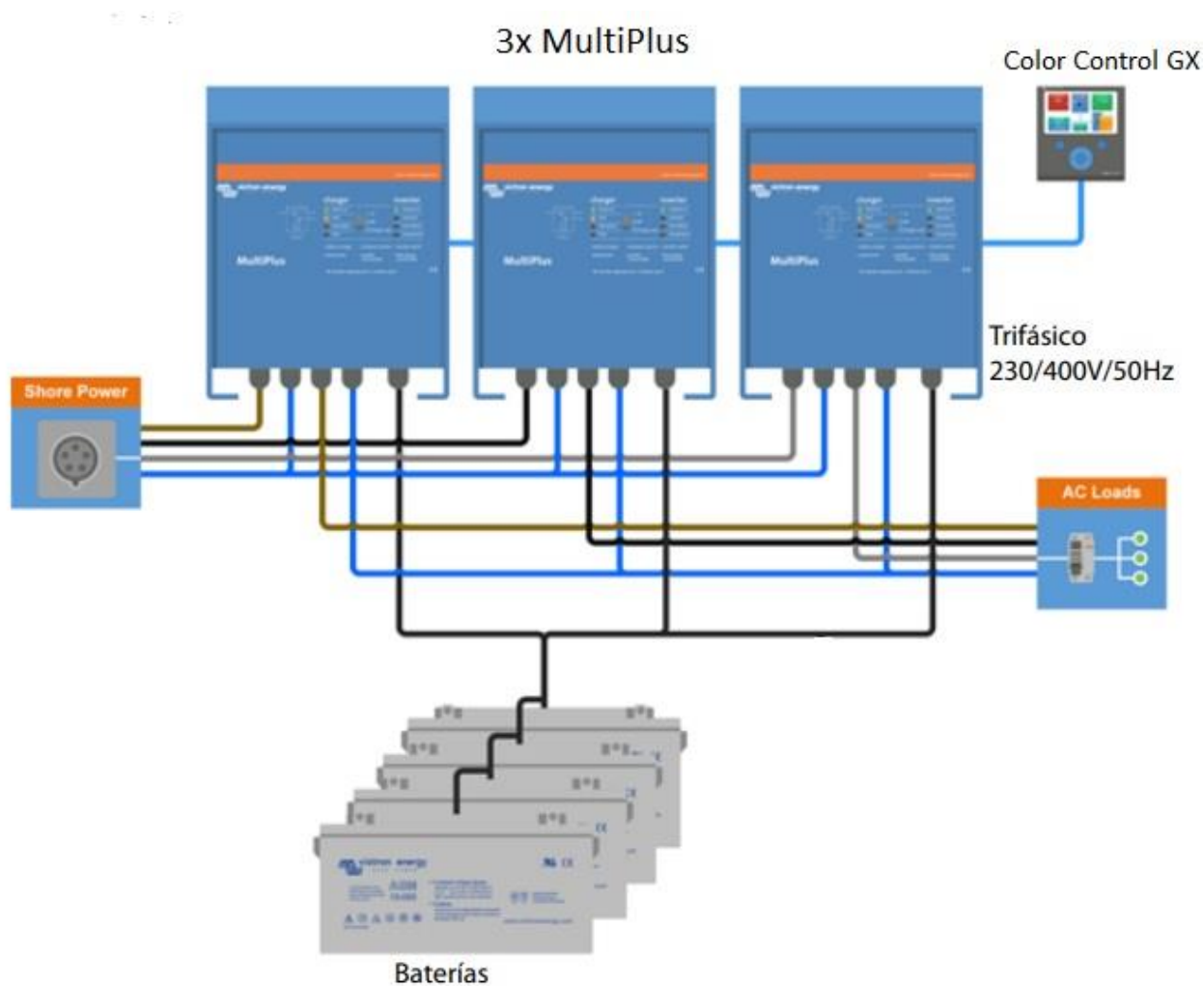


Fig. 31. Conexión de inversores en modo trifásico [8].

Configuración monofásica reforzada: Los tres inversores compartirá una fase en común en la entrada desde la red eléctrica y como la salida también será una fase. La demanda de corriente por la carga será entregada por los tres inversores de forma equilibrada.

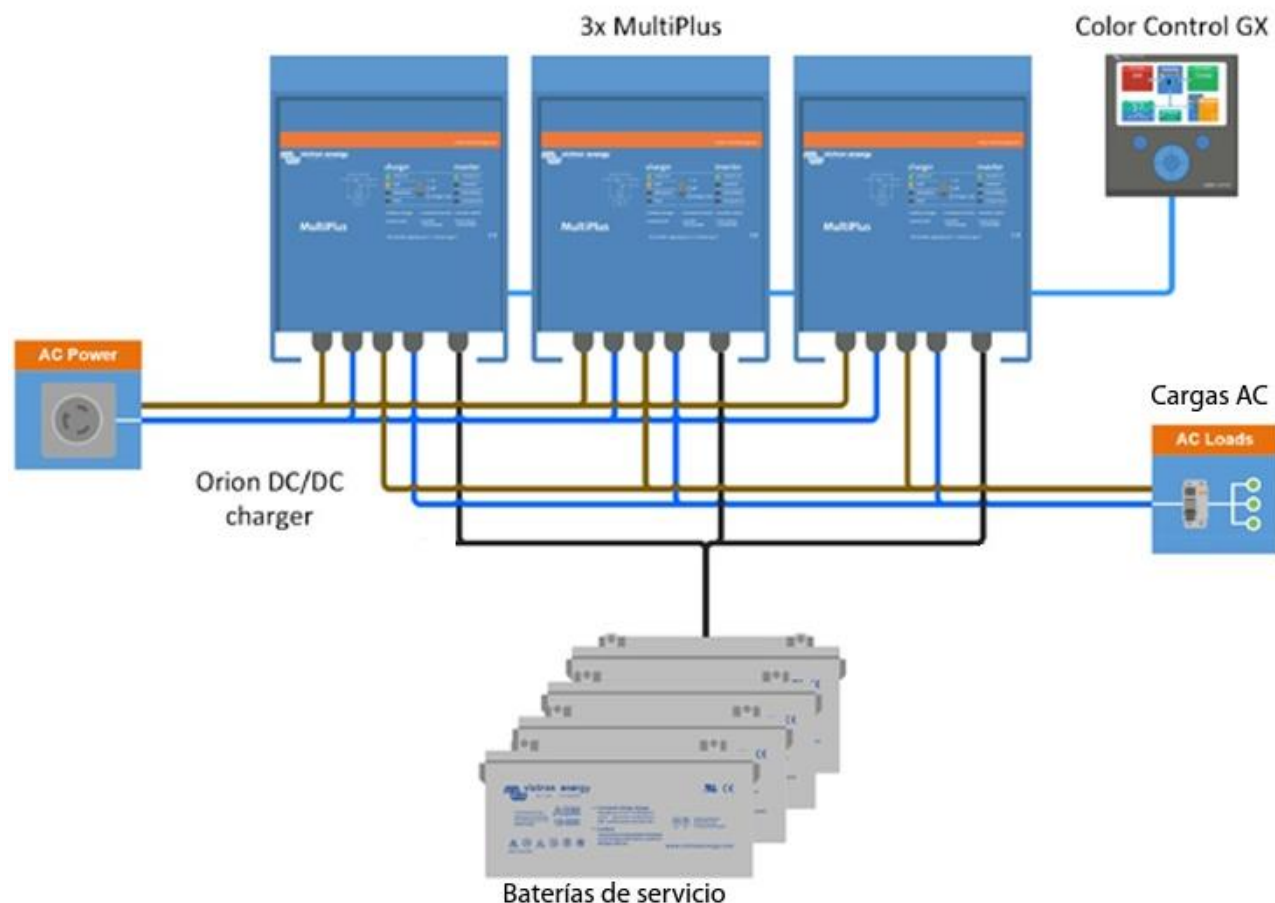


Fig. 32. Conexión inversores en modo monofásico [8].

Además, el equipo cuenta con funciones integradas y acciones automáticas configurables, incluyendo la activación y parámetros de funcionamiento para cada caso específico. Entre las funciones de mayor interés y uso en el proyecto, se destacan las siguientes:

Alimentación CA interrumpida: En caso de falla de alimentación de la red eléctrica externa, el inversor se activará automáticamente asumiendo el suministro eléctrico para las cargas, de forma rápida (menos de 20 milisegundos) permitiendo el trabajo sin interrupciones

Una característica a destacar es una función que trabaja junto a la red eléctrica en ciertas condiciones actuando como un tipo de UPS (Uninterruptable Power Supply). Pero no permitiendo una operación de ambas fuentes al mismo tiempo.

Power Control y Assist: Función para la operación en conjunto entre la red eléctrica y el inversor para la carga,

-PowerControl: se puede establecer una corriente máxima proveniente de la red eléctrica para evitar sobredemanda.

-PowerAssist permitiendo que el inversor complemente la demanda de la carga si la red eléctrica no es suficiente en picos de potencia en un **corto espacio de tiempo**.

2.7.3 Panel monitor Color Control GX.

El Color Control GX de Victron Energy es un panel de control táctil que monitorea y controla los dispositivos conectados a un sistema de energía renovable. Con su pantalla de alta resolución, brinda información en tiempo real sobre la producción solar fotovoltaica, consumo de energía, carga de la batería, estado del inversor y más. Además, se puede programar ajustes y alarmas, actualizar firmware y controlar el sistema a través de Internet o red local. El Color Control GX es una herramienta poderosa para optimizar el uso de energía renovable en sistemas autónomos o conectados a la red, y se integra con la plataforma Victron Remote Management para el registro de variables eléctricas y análisis del sistema. Con el cable VE-Direct se puede comunicar con los controladores de carga MPPT y visualizar el flujo de energía entre el cargador, la red y los paneles fotovoltaicos.

Tabla 10. Extracto ficha técnica monitor color control GX.

Tipo	Valor	
Modelo	Color Control GX	
Tensión	8-70 V	V
Corriente (24v)	80-125 mA	mA
Dimensiones	130 x 120 x 28 mm	mm
Puertos de comunicación	VE.Bus, VE.Direct, VE.Can, USB, Ethernet.	
Reley libre	3A/ 30VDC /250 VAC	

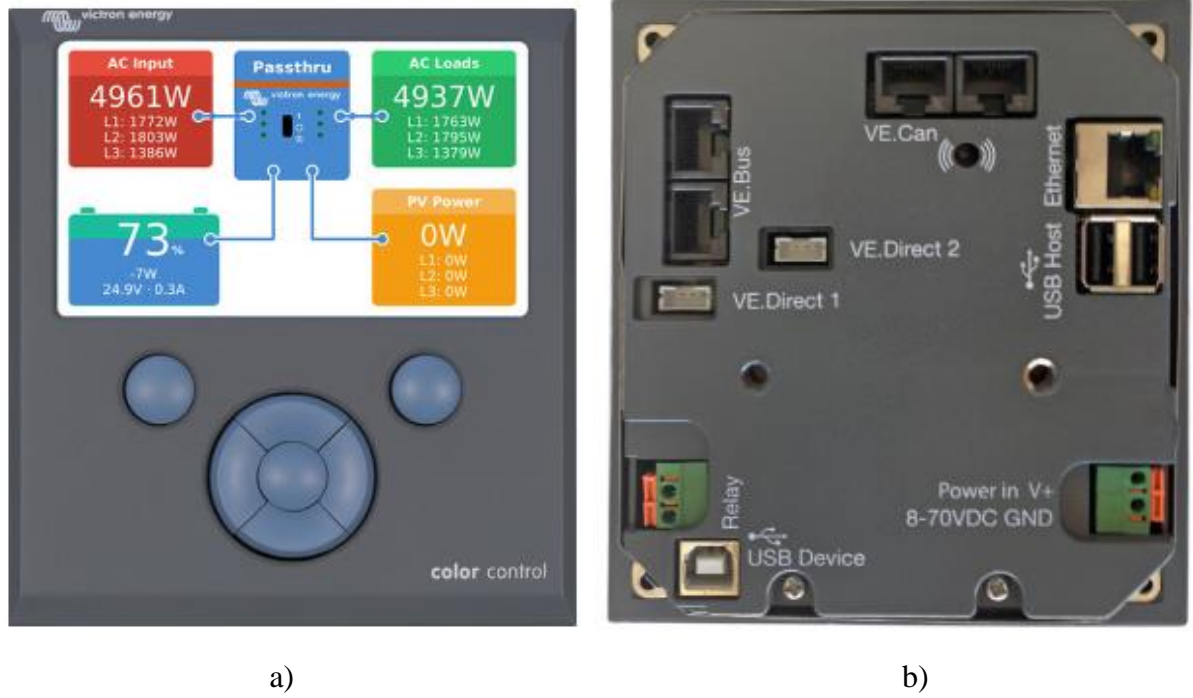


Fig. 33.a) Vista frontal del monitor Color Control GX. b) Vista posterior de los conectores [8].

2.7.4 Paneles Fotovoltaicos.

En el costado del laboratorio se encuentra un sistema de paneles fotovoltaicos (Figura 34) compuesto por seis paneles policristalinos (Tabla 11) que están fijados a una estructura de aluminio debidamente conectada a tierra. Los paneles se distribuyen en tres grupos, cada uno de ellos compuesto por dos paneles fotovoltaicos conectados en serie. Cada grupo se conecta al tablero de distribución CC, ubicado en el interior del laboratorio, donde se encuentra conectado un interruptor bipolar de protección térmica CC de 16A. Un grupo se conecta al inversor 1, mientras que los otros dos grupos se conectan al inversor 2, quedando el inversor 3 sin grupo de paneles, ya que controla la inyección de energía de los paneles fotovoltaicos a través del controlador de carga. Esta información se registra por el monitor Color Control GX, que solo puede conectar dos controladores de carga, tal como se describe en la sección "Monitoreo del sistema fotovoltaico".



Fig. 34. Paneles fotovoltaicos instalados en el laboratorio de secado Geosolar. Elaboración propia.

Tabla 11. Extracto ficha técnica panel fotovoltaico (1 unidad).

Tipo	Valor	
Modelo	Photovoltaic module	
Voltaje máx.	41.4	V
Corriente máx.	9.55	A
Potencia máx.	395	W
Voltaje serie máx.	1500	V
Corriente serie máx.	20	A
Dimensiones	1979x1002x40	mm

2.7.5 Banco de baterías.

En un sistema fotovoltaico, el banco de baterías se encarga de almacenar la energía generada por los paneles solares para su uso posterior cuando no haya suficiente energía solar fotovoltaica disponible. La configuración del banco de baterías consta de cuatro unidades de batería tipo gel (plomo ácido con electrolito en formato gelatinoso) conectadas en dos grupos de dos baterías en serie, los cuales a su vez están conectados en paralelo (Figura 35). La ficha técnica de la Tabla 12 se refiere a una sola unidad de batería, mientras que el banco de baterías tiene una tensión total de 24V y una capacidad de corriente total de 200 Ah. El circuito de CC está protegido por un interruptor automático 3X200ACC que se encuentra en el tablero DC.

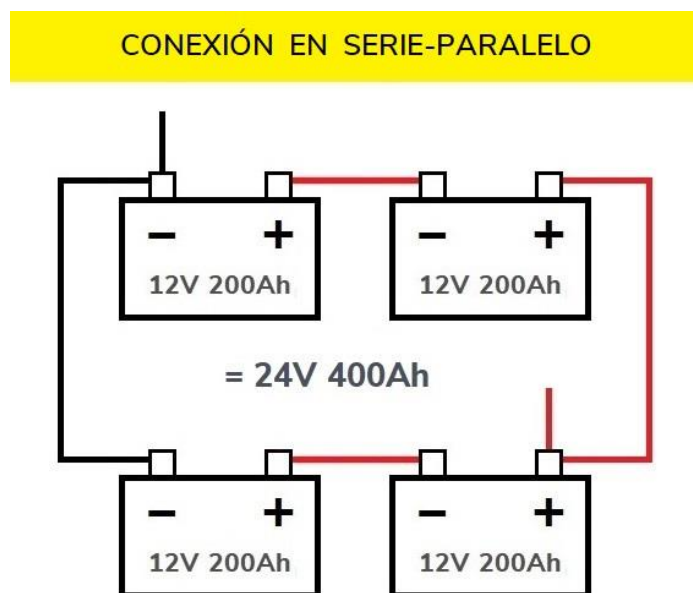


Fig. 35. Formato conexionado banco batería inversor. Elaboración propia.

Tabla 12. Extracto ficha técnica batería Eltrik 12V del banco de baterías.

Tipo	Valor	
Marca	Eltrik®	
Modelo	LPG12-100S	
Tipo batería	Gel	
Voltaje	12	V
Capacidad Corriente	100	Ah
Peso	31.2	kg



Fig. 36. Banco de batería instalado en el LSG. Elaboración propia.

2.8 Discusión y Conclusiones

La combinación de tecnologías de vanguardia, como los equipos de inversores solares y la BCG, junto con el sistema de aerotérmico solar, ha resultado en un sistema altamente eficiente en la producción de energía. La integración sinérgica de estos sistemas permite al sistema de aerotérmico solar proporcionar energía térmica en días soleados, reduciendo la carga de trabajo de la BCG y mejorando la eficiencia general del sistema. Además, la flexibilidad para adaptarse a diferentes condiciones climáticas, gracias a las fuentes de calor que dependen de diversas energías primarias, garantiza una respuesta efectiva a cualquier deficiencia en el sistema. Sin embargo, el éxito del funcionamiento del sistema depende en gran medida de la capacidad del sistema fotovoltaico para suministrar a las cargas existentes y mantener la vida útil de las baterías. En caso contrario, será necesario buscar alternativas basadas en la combinación de tecnologías disponibles. En conclusión, la combinación de tecnologías es fundamental para lograr un sistema de producción de energía eficiente y flexible.

3 Sistema de distribución eléctrica

3.1 Introducción

En este capítulo nos adentraremos en la configuración eléctrica del laboratorio de secado geosolar. Exploraremos el origen del alimentador principal eléctrico y la distribución ordenada de los tableros eléctricos en la sala de máquinas. Además, profundizaremos en el trabajo realizado con los inversores, abarcando tanto las configuraciones eléctricas entre inversor y tablero, como la programación de los equipos en cuanto a modo de trabajo y parámetros. Este análisis detallado nos permitirá comprender cómo se logra la eficiencia energética en este LSG y cómo se puede replicar en otros proyectos similares.

3.2 Distribución Tableros eléctricos

Al tratarse de un sistema eléctrico fotovoltaico, es necesario separar los circuitos CA y DC en tableros diferentes, ya que cuenta con fuentes de energía alternas y continuas. En este sentido, se analizarán los tableros eléctricos según el tipo de tensión y su función.

Los tableros eléctricos instalados están hechos de metal y recubiertos con pintura electrostática para protegerlos de la corrosión. Además, cuentan con cierres de empaquetadura de silicona que garantizan una buena protección contra el agua y el polvo.

En el laboratorio, se encuentran cuatro tableros eléctricos, como se muestra en la figura 37, un diagrama ilustrativo que muestra los tableros y su relación entre sí, así como la separación de los circuitos alternos y continuos. El único punto en común entre ellos son los inversores.

Tabla 13. Significado nombres de cada tablero existente en LSG.

Abreviación	Descripción
TG	Tablero General
TD	Tablero Distribución
TDC	Tablero Corriente Continua
TFyA	Tablero Fuerza y Alumbrado

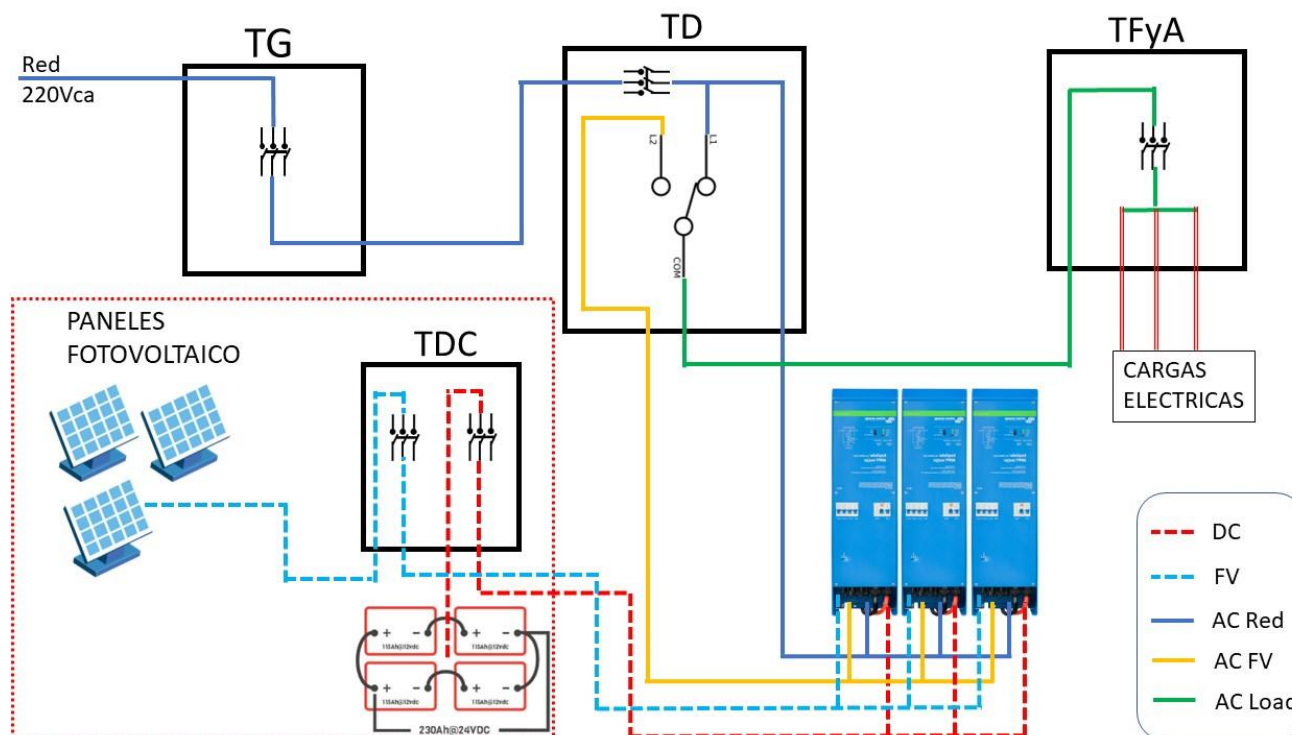


Fig. 37. Diagrama ilustrativo de la distribución de los tableros del LSG. TG: Tablero general. TD: Tablero distribución. TDC: Tablero corriente continua. TFyA: Tablero fuerza y alumbrado red trifásica 400Vac. Elaboración propia.

- **Línea azul continua:** Corresponde a conductores con energía de la red eléctrica que se encuentra en los tableros TG y TD para energizar los inversores y de ser el caso el tablero TFyA.
- **Línea amarilla continua:** Es la energía que entrega los inversores, pudiendo ser de las baterías o de la red eléctrica dependiendo de las condiciones de carga de la batería.
- **Línea verde continua:** Es todo lo que se encuentra después del selector en el TD, es decir, todas las cargas del edificio.
- **Línea roja discontinuas:** Es el circuito en corriente continua con relación a los inversores y las baterías.
- **Línea azul discontinuas:** Es otro circuito de corriente continua, pero correspondiente solo a los paneles fotovoltaicos entregando energía a los controladores de carga, los cuales inyectarán a las baterías.

3.3 Alimentador principal edificio.

El edificio LSG recibe energía desde las instalaciones que se encuentran al costado, llamado Edificio de Energía de la UCSC, en el cual del tablero principal de nombre TGDFACyUE que se encuentra en el exterior y del cual sale un alimentador hacia el LSG de forma subterránea señalada por la línea azul en la siguiente figura.



Fig. 38. Vista aérea línea eléctrica desde el tablero del edificio de energías hasta el LSG. Elaboración propia

La línea eléctrica mencionada anteriormente es protegida por un interruptor automático de 3X20A con el nombre TDF “H” hasta el tablero general del LSG.



Fig. 39. a) Vista exterior tablero TGDFACyUE edificio de energías. b) Interruptor automático del alimentador hacia el LSG. Elaboración propia.

3.4 Tablero general del LSG.

La línea eléctrica que abastece al LSG ingresa a la sala de máquinas y llega al tablero general (TG) ilustrado en la figura 40. Este es el único punto de entrada de la línea eléctrica externa al sistema. La protección general del sistema se logra mediante un interruptor automático de 3X20A que regula el flujo eléctrico. Desde este interruptor, la corriente fluye hacia las barras de conexión. A continuación, se deriva una línea hacia un interruptor automático de 4X16A que alimenta el tablero de distribución, ubicado en el costado izquierdo del TG. Los demás interruptores automáticos del sistema son para salidas monofásicas, luces piloto y se mantienen disponibles para futuras cargas.

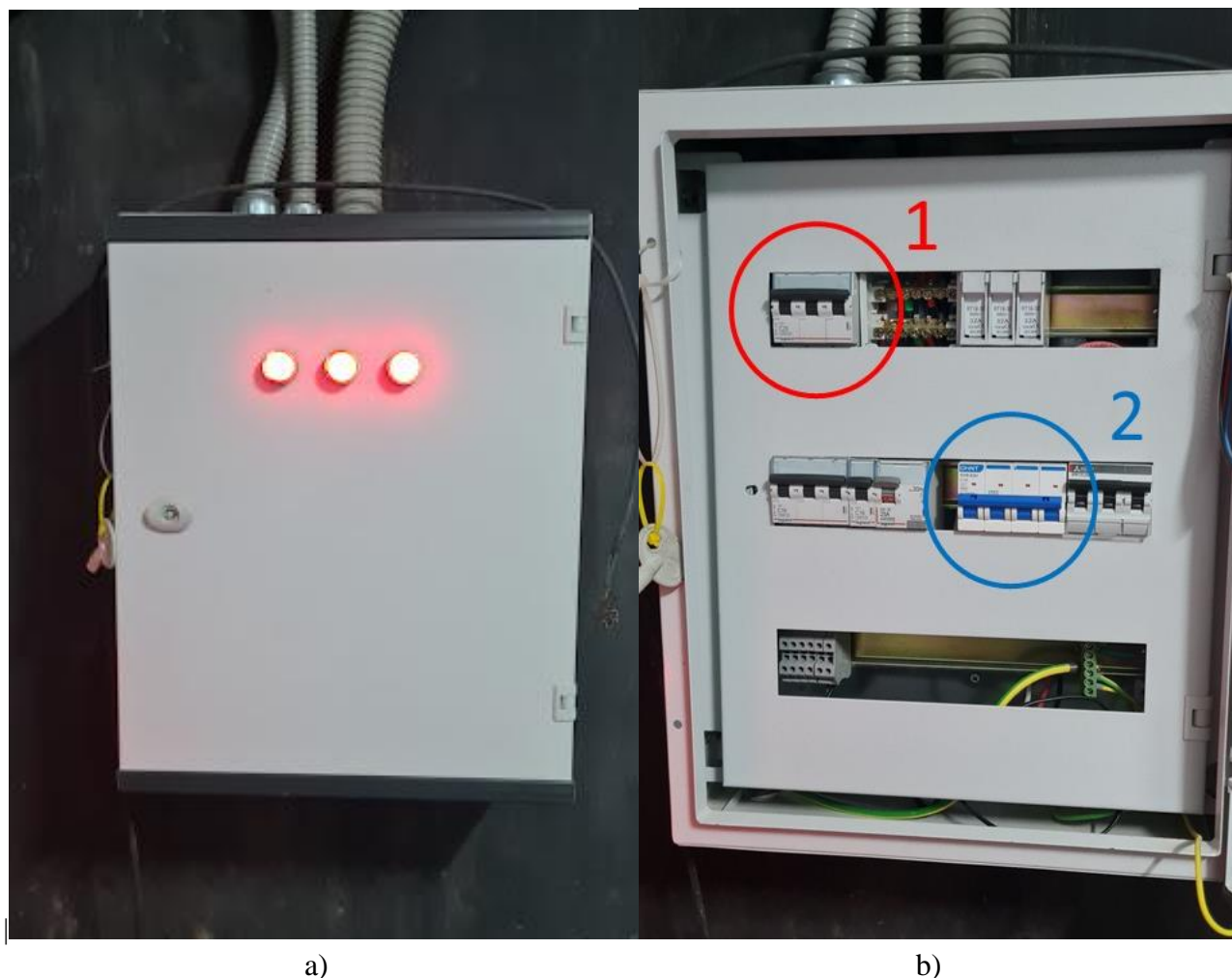


Fig. 40. a) Vista externa del tablero eléctrico general del LSG. b) Protección principal de 3 polos (1) y protección para el suministro del tablero TD 4 polos (2). Elaboración propia.

3.5 Tablero de distribución del LSG.

El tablero de distribución (TD), ilustrado en la figura 41-a, recibe su nombre debido a que es el lugar donde se realiza la conexión entre la red eléctrica y el sistema fotovoltaico con una salida para la línea de alimentación para la carga. Este tablero es alimentado por el TG y cuenta con una protección general de un interruptor diferencial de 4X25A y un interruptor automático de 4X16A.

En el exterior, el TD cuenta con cuatro juegos trifásicos de luces piloto, cada uno compuesto por tres luces, y un selector de tres posiciones que se muestra en la figura 41-b. Cada juego de luces piloto está protegido eléctricamente por fusibles de cerámica.

La parte exterior del tablero cuenta con un selector eléctrico y luces piloto que facilitan la selección del circuito a utilizar con nombres descritos en la tabla 14. Este selector es de tres posiciones: 1, 0 y 2, permitiendo la elección de la fuente de energía para la alimentación de la carga. Dependiendo de la selección realizada, se puede trabajar con los inversores o la red eléctrica de forma independiente, ya que ambos circuitos se desconectan físicamente. La salida del selector se conecta directamente al tablero TFyA y se indica con las luces piloto "a la bomba de calor". Para más detalles sobre cada opción del selector, se puede consultar la tabla 15.

Tabla 14. Significado nombres circuitos del selector tablero de distribución.

Abreviación	Descripción
De tab gen.	Energía de red eléctrica trifásica desde el TG
De inversores a selector.	Energía desde los inversores
De red elec a selector.	Energía directa desde la red eléctrica.
A bomba de calor.	Salida hacia el tablero fuerza y alumbrado (TFA).

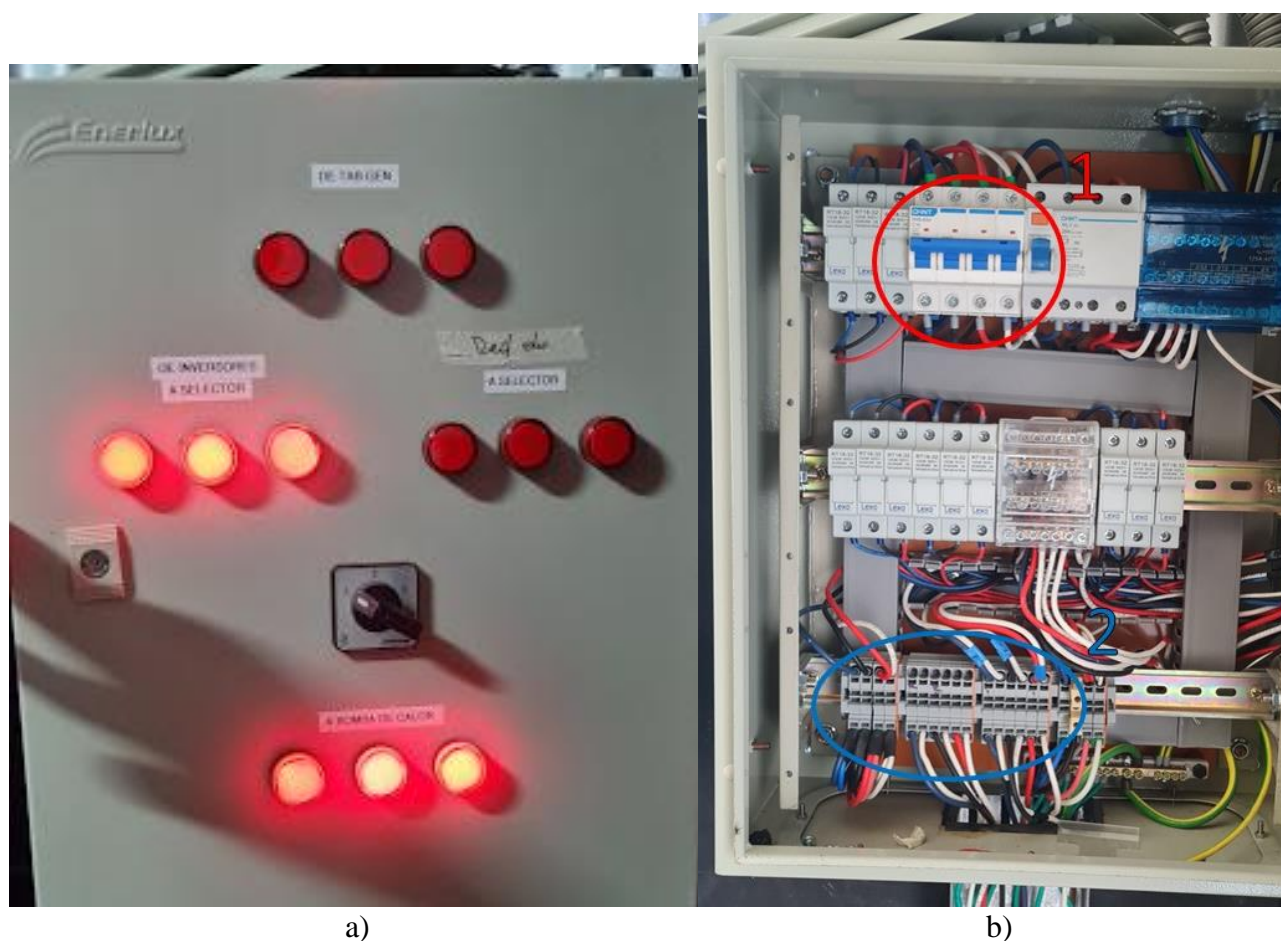


Fig. 41. a) Vista principal del tablero de distribución (TD). b) Interior del TD (1) con el interruptor automático principal y (2) Regleta conexiones inversor fotovoltaico. Elaboración propia.

Tabla 15. Descripción posiciones para selector en TD.

Posición	Descripción
1	Energía desde los inversores.
0	Sin conexión.
2	Energía directa desde la red eléctrica.

En la parte inferior del tablero se encuentra una regleta de conexiones (figura 42), donde se realizaron las conexiones entre los inversores y la red eléctrica trifásica. Se conectó una fase a cada inversor y se compartió el neutro. La salida de los inversores se conecta al mismo punto, con su fase correspondiente y su propio neutro, antes de conectarse al selector mencionado anteriormente. Además, se incluye un cable de tierra que conecta los inversores al sistema de puesta a tierra. La escalerilla se utiliza para almacenar los cables.

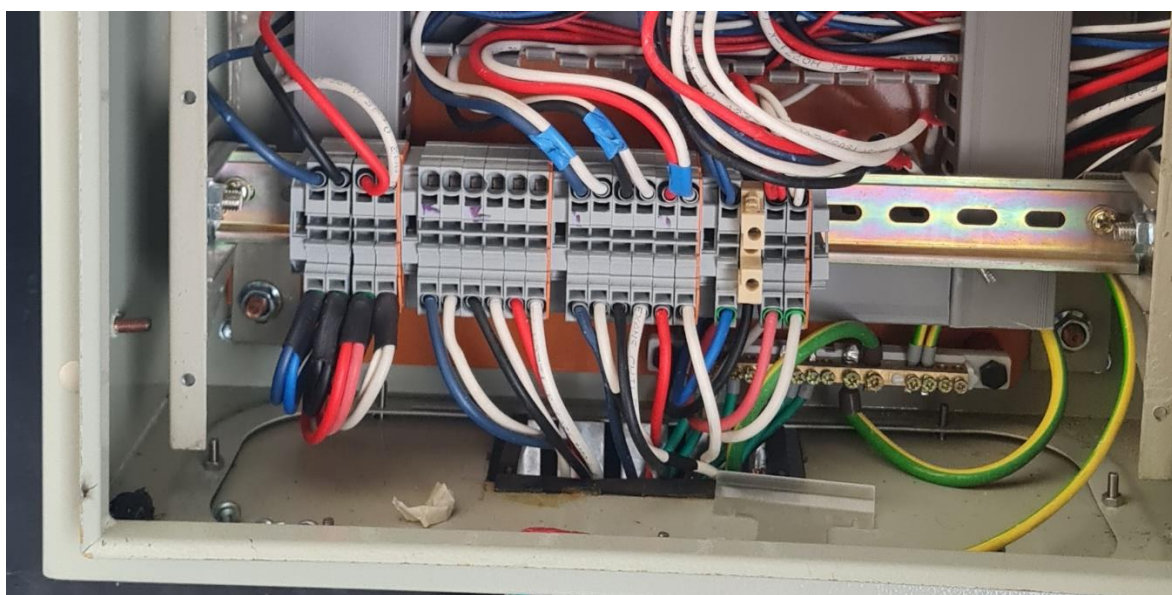


Fig. 42. Regleta de conexiones inferior de conductores de los inversores. Elaboración propia.

3.6 Tablero de fuerza y alumbrado del LSG.

La energía se suministra al tablero de fuerza y alumbrado, que se encuentra en el lado opuesto del TD, desde el selector mencionado anteriormente. El TDFyA recibe energía y está equipado con un interruptor automático 3x16A que actúa como protección general y se conecta a una barra de conexiones. Desde esta barra, se distribuyen distintos circuitos para la alimentación de los equipos del sistema de secado, como iluminación y enchufes, bomba de calor, tres bombas de agua externas, FanCoil, ventilador centrífugo del techo aerotérmico UCSC y monitoreo de temperaturas. Cada uno de estos circuitos está protegido con los dispositivos de protección eléctrica descritos en la tabla 16.

Tabla 16. Listado protecciones eléctricas en TFyA en LSG.

Nombre	Tipo	Descripción
ID	Diferencial 2X25A	Protección diferencia enchufes y alumbrado
F0	Interrp. Autom. 3X25A	Protección general circuito
F1	Guarda motor 3X25A	Bomba de calor geotérmica
F2	Guarda motor 3X25A	Bomba de agua externa BBA1
F3	Guarda motor 3X25A	Bomba de agua externa BBA2
F4	Guarda motor 3X1.6A	Bomba de agua externa BBA3
Q1	Interrp. Autom. 3X10A	Bomba de calor geotérmica
Q2	Interrp. Autom. 1X2A	Bomba de agua externa BBA1
Q3	Interrp. Autom. 1X2A	Bomba de agua externa BBA2
Q4	Interrp. Autom. 1X6A	Bomba de agua externa BBA3
Q5	Interrp. Autom. 1X2A	Transformador 220V a 110V
Q6	Interrp. Autom. 1X10A	Alumbrado
Q7	Interrp. Autom. 1X16A	Enchufes
Q8	Interrp. Autom. 1X10A	Instrumentación temperatura



Fig. 43. Tablero TFyA en LSG. a) Vista exterior. b) Vista interior en ensayos eléctricos. Elaboración propia.

3.7 Tablero eléctrico DC del LSG.

El sistema de corriente continua está compuesto por las baterías, los inversores y los paneles fotovoltaicos, y debido a su proximidad entre ellos, se ha dispuesto un único tablero para este sistema con el objetivo de reducir las pérdidas de potencia en los conductores. En este tablero, se encuentra un interruptor automático de 3X200ADC con el positivo conectado en un solo polo del interruptor para proteger al banco de baterías. Los positivos de las baterías se conectan a una barra de distribución, mientras que los negativos se conectan a otra barra paralela de forma directa. Los inversores se conectan a esta misma barra.

Además, en el mismo tablero, se encuentran los interruptores automáticos polarizados de 2X16ADC para los paneles fotovoltaicos. Estos interruptores protegen ambas polaridades y se conectan a los inversores. Hay tres interruptores automáticos en total, y cada uno de ellos protege a dos paneles fotovoltaicos. Cabe mencionar que los inversores no están conectados directamente al circuito de baterías, y todos los interruptores automáticos son para tensiones CC.

Tabla 17. Extracto ficha técnica de interruptores automáticos existentes en tablero DC del LSG.

Tipo	Interruptor automático paneles FV	Interruptor automático Banco baterías
Marca	Chint	ABB
Modelo	NB1-63DC 2 polos	A2B 250
Tensión	500V _{DC}	250V _{DC}
Corriente Nom	16A _{DC}	250A _{DC}
Corriente Rup	6kA _{DC}	18kA _{DC} 2p

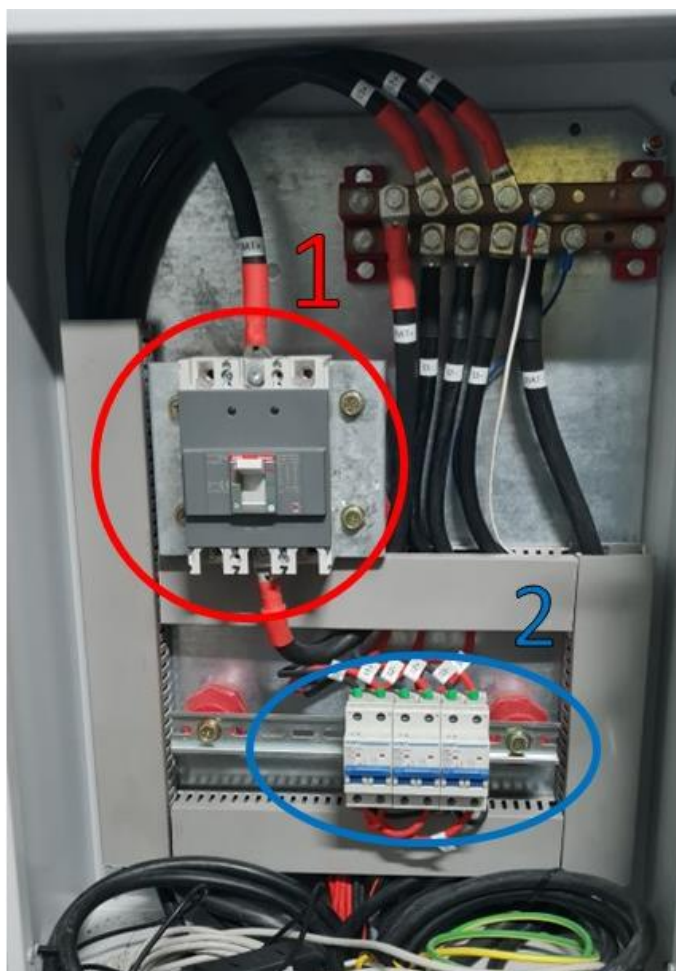


Fig. 44. Vista interior tablero DC. 1) interruptor automático banco de baterías, 2) Interruptores automáticos de paneles fotovoltaicos. Elaboración propia.

3.8 Configuración de inversores Victron Energy.

Para poner en marcha varios inversores por primera vez, es necesario configurar el modo de trabajo, ya que existen cinco opciones que generan formas de onda diferentes. En el caso del LSG, se dispone de tres inversores, pero solo dos opciones de trabajo están disponibles: Monofásico (220Vrms) y Trifásico (380Vrms), mientras que las otras opciones son bifásicas y no se utilizan en este sistema.

Para configurar los inversores, es necesario conectarlos en serie como se muestra en la figura 45, utilizando un cable de red RJ45 UTP CAT5. A continuación, se debe conectar el extremo del cable de red (figura 46-b) a la pantalla Color Control y el otro extremo en el adaptador USB (figura 46-a), lo que permite la comunicación entre los tres inversores y una computadora. Para cargar la configuración previamente establecida, se deben seleccionar las opciones *Configure/Send configuration*. Al hacerlo, se mostrará un mensaje de confirmación de que los datos se han cargado en los inversores, los cuales se reiniciarán automáticamente.

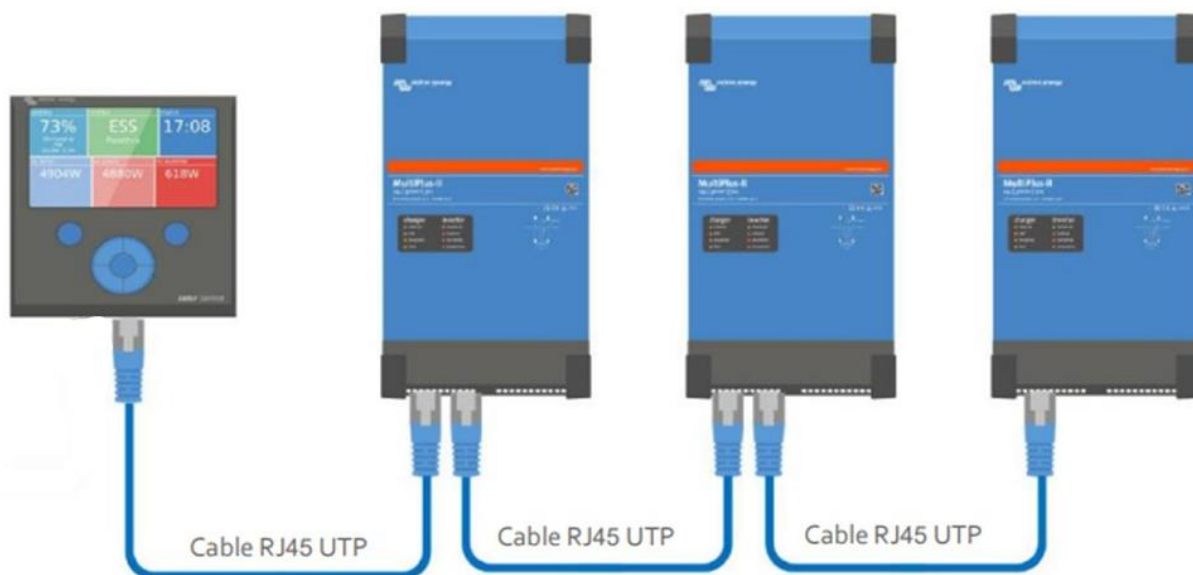


Fig. 45. Conexión inversores en serie al Color Control GX por cable de red . [8].

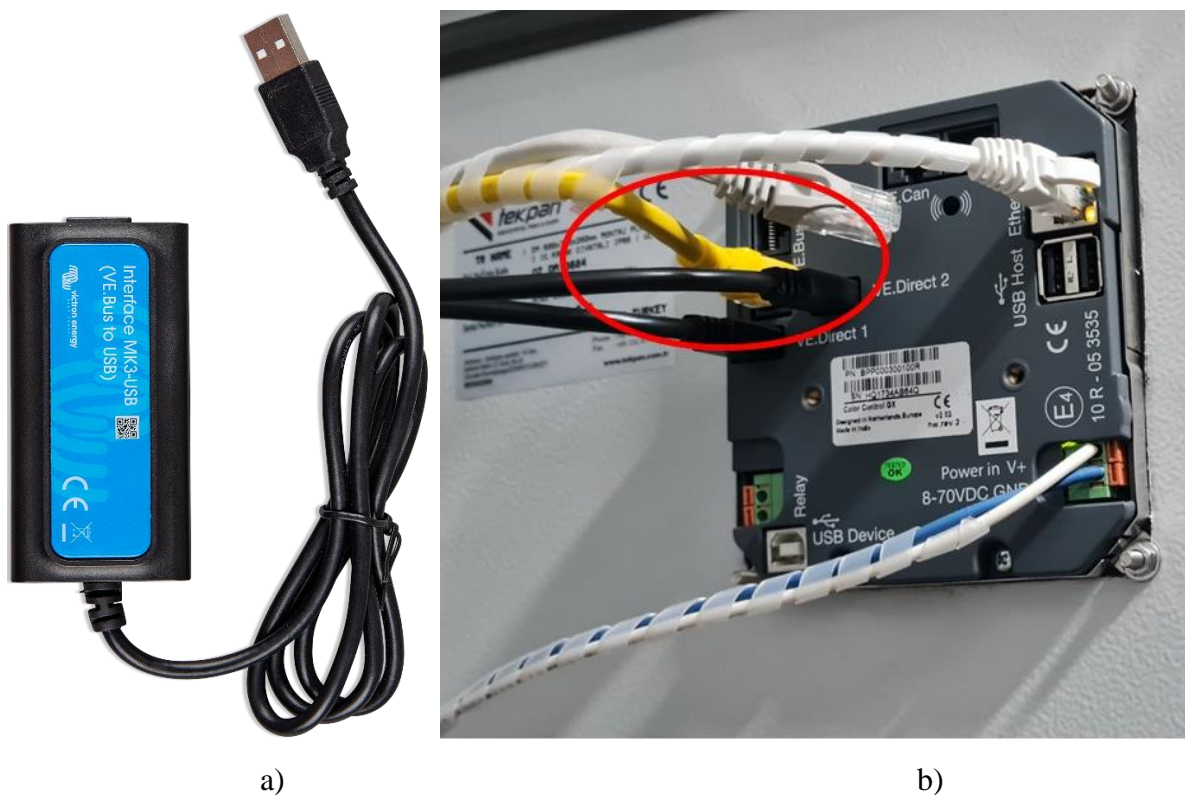


Fig. 46. a) Adaptador *VE.Bus a USB Interface MK3-USB*. b) Cable red (amarillo) comunicación con inversores. [8] y Elaboración propia.

La configuración de los inversores se puede realizar con el programa *VE.Bus Configure*, el cual detecta automáticamente los equipos una vez que los inversores están encendidos y el adaptador está conectado. Una respuesta exitosa se indicará por la cantidad correcta de inversores, como se muestra en la figura 47. En este caso particular, los inversores se encuentran en la fase L1 y en modo monofásico debido a una configuración previa. En caso contrario, la cantidad de inversores se mostrará en la sección superior con el nombre "Dispositivos no configurados".

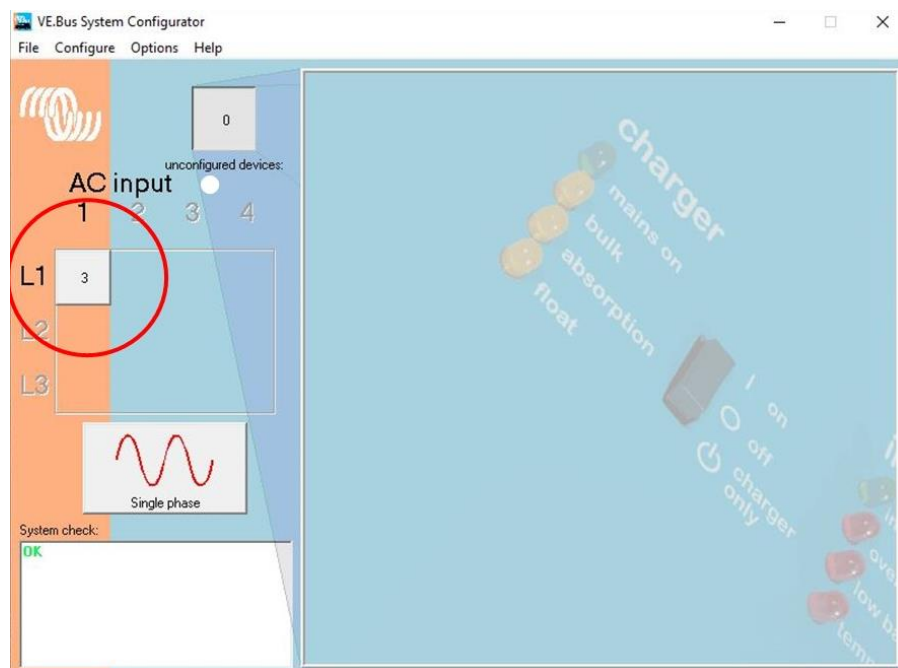


Fig. 47. Programa ya reconociendo los tres inversores. Elaboración propia.

A continuación, se debe seleccionar el tipo de salida eléctrica deseada marcando la casilla correspondiente, ya sea para un modo monofásico (Single Phase) o trifásico (Three Phase), como se muestra en la figura 48. Esta elección permite la comunicación y sincronización de las ondas de fase de los equipos según sea necesario. En el recuadro de opciones a la derecha de AC Input, se puede establecer si hay más de una fuente de alimentación eléctrica disponible además de los inversores. Sin embargo, en este caso solo se utiliza una fuente.

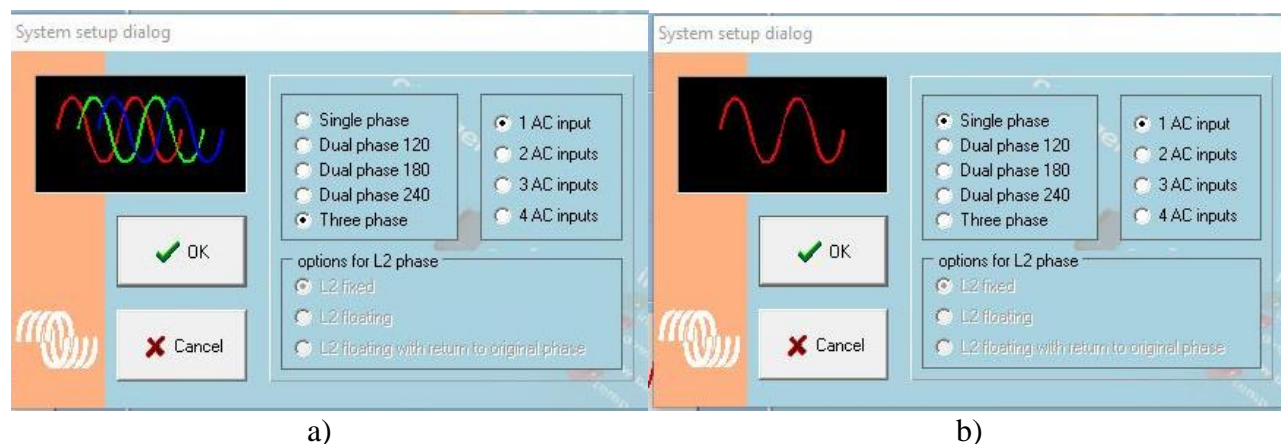


Fig. 48. Ventana selección modo de la salida de los inversores. a) Opción trifásico. b) Opción monofásico. Elaboración propia.

Para seleccionar el modo de una sola fase (single phase), es necesario configurar los tres inversores para que trabajen sincronizados en una sola fase de alimentación y salida, conocida como fase reforzada. Para hacerlo, en el recuadro derecho se muestran los tres inversores y se deben arrastrar con la flecha hacia el recuadro gris al lado de la letra "L1", repitiendo el mismo proceso para los tres inversores, tal como se muestra en la figura 49. De esta manera, se indica a los equipos que solo habrá una fase de salida.

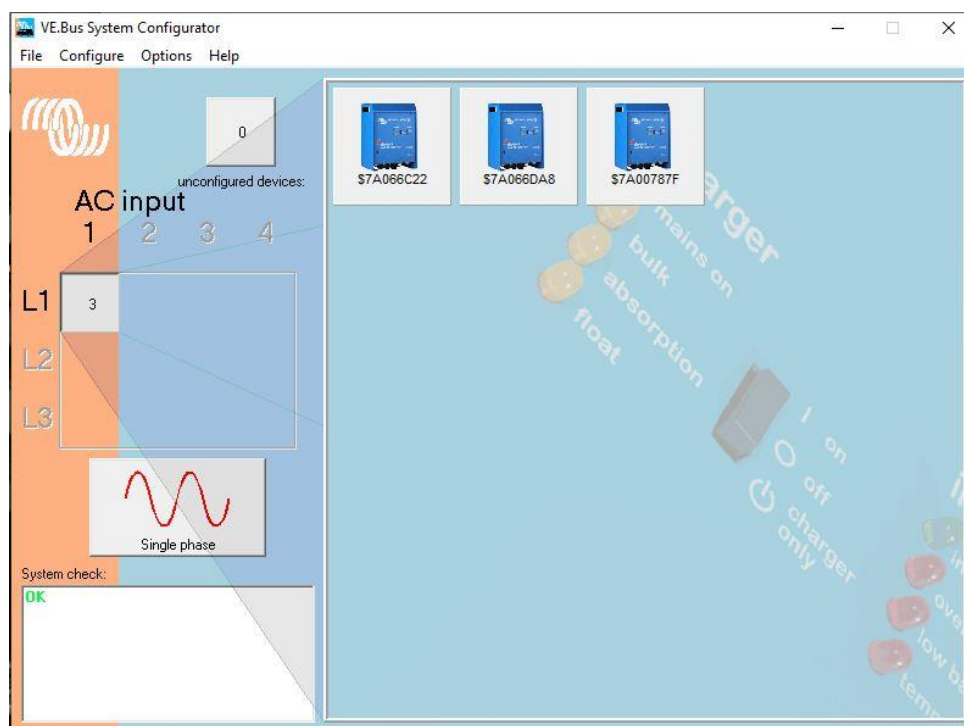


Fig. 49. Selección de la salida modo monofásico con los tres inversores. Elaboración propia.

Si se elige el modo Three phase, se deben colocar los 3 inversores en el recuadro derecho, asignando cada equipo a una salida de fase L1, L2 y L3. De esta manera, cada inversor trabajará en su propia fase, lo que permitirá producir un desfase de 120° entre fases y asegurar la coordinación entre los equipos, tal como se ilustra en la figura 50.

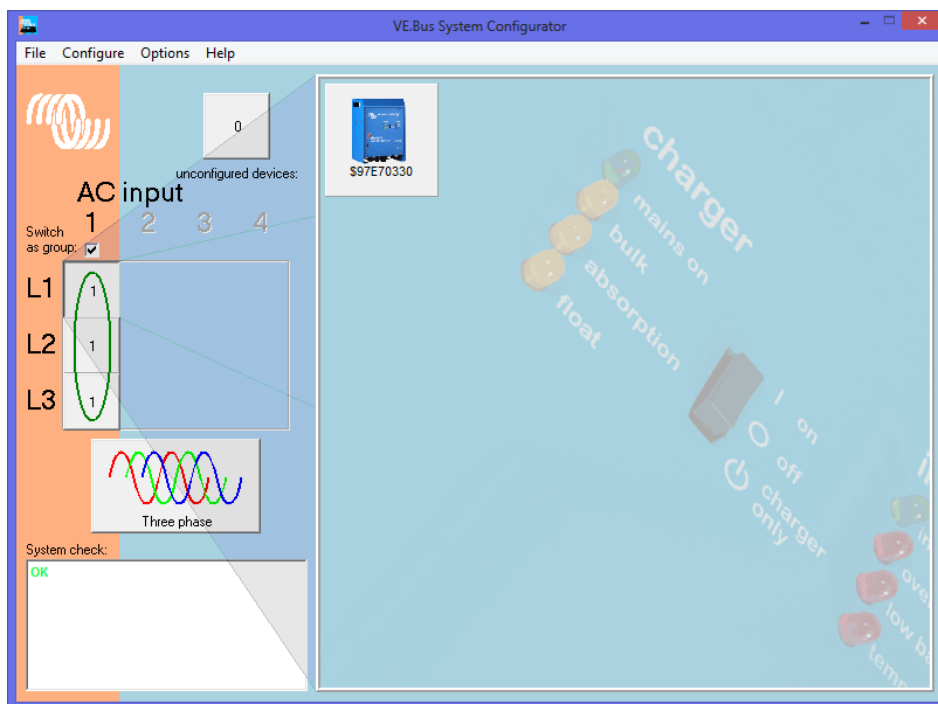


Fig. 50, Configuración para modo trifásico de los tres inversores. Elaboración propia.

Para finalizar, es importante cargar la configuración previamente establecida. Para ello, es necesario buscar la opción "Configure/Send configuration" en el menú y seleccionarla. Al hacerlo, se mostrará un mensaje de confirmación indicando que los datos se han cargado correctamente en los inversores, los cuales se reiniciarán automáticamente para que los cambios surtan efecto.

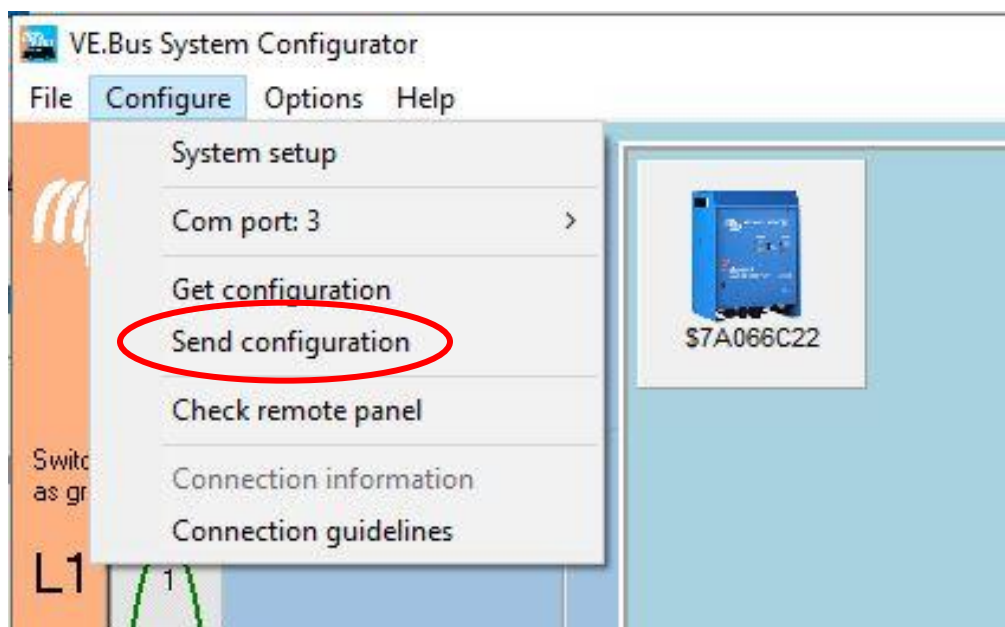


Fig. 51. Opción *Send Configuration* sirve para cargar la nueva configuración a los equipos. Elaboración propia.

Para completar la configuración de los inversores, es necesario utilizar el programa VictronConnect. Este programa es el principal para controlar y configurar diversas opciones, como la energía de entrada, de salida, el control de carga de la batería, y otros ajustes generales. A través del adaptador USB y el programa VRM, es posible tener un control en tiempo real de los parámetros del inversor en funcionamiento, como las potencias alternas en IN y OUT, el estado de la batería y la potencia que se está operando.



Fig. 52. Vista inicial programa Victron Connect en computadora. Elaboración propia.

Para configurar la entrada CA del inversor, se debe acceder a las opciones de ajuste y control, tal como se muestra en la figura 53. Aquí, es posible activar y ajustar la opción de conectar directamente la red eléctrica a la carga si se cumplen ciertas condiciones, como que la carga no exceda una cierta capacidad de potencia o que se tenga un nivel mínimo de carga de la batería para iniciar la etapa de carga. Esto proporciona un control programable en varias variables, lo que ayuda a proteger la vida útil del banco de baterías. Además, se puede establecer un ciclo de la batería que varía desde el 90% hasta la descarga mínima del 50%. Esto evita el parpadeo por fluctuaciones de voltaje y garantiza que la carga funcione de manera estable.

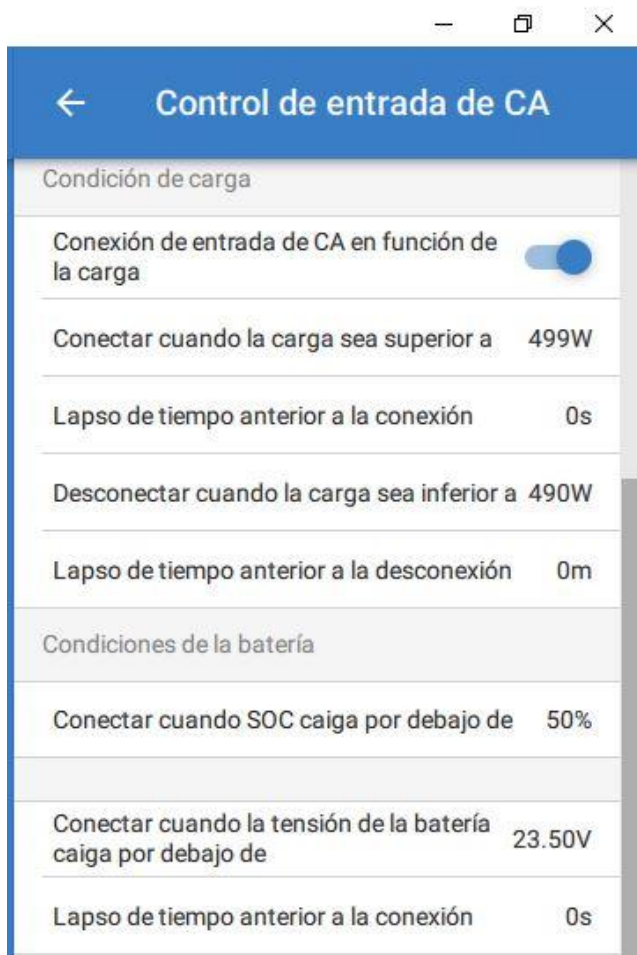


Fig. 53. Apartado de configuración conexión y desconexión red eléctrica.

3.8.1 Control de carga de las baterías.

Para configurar la carga de las baterías, diríjase a la sección "Ajustes" y luego a la sección "Cargador". Encontrará la opción de ajuste "Corriente de carga" como se muestra en la figura 54-a.

El cargador tiene una corriente máxima de 40 A, por lo que es necesario configurar el equipo Victron Energy para establecer la corriente máxima de carga para el banco de baterías. Se recomienda que la corriente de carga se establezca entre el 10% y el 20% de la capacidad de corriente de la batería [9]. En este caso, al tener tres inversores entregando carga al banco de baterías, es necesario calcular la corriente máxima que cada inversor entregará. Esto se logra dividiendo la corriente de carga del banco de baterías por tres, mostrado en la siguiente ecuación:

$$A_{carga} = \frac{A_{bateria} * C_{carga}}{N^{\circ}_{inversores}} = 20A \quad (1.1)$$

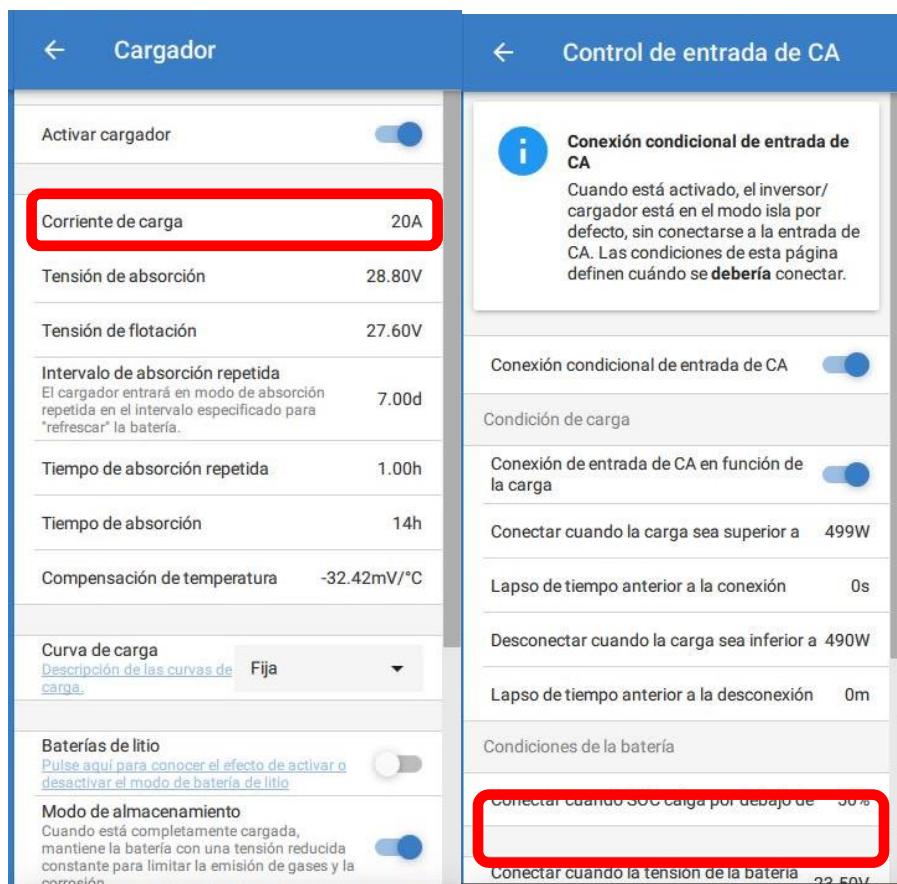
Donde:

$A_{bateria}$: Capacidad corriente banco batería.

C_{carga} : Porcentaje de corriente de carga, siendo en este caso 15%.

$N^{\circ}_{inversores}$: Cantidad de inversores que entregan carga.

La descarga del banco de batería, al tratarse de baterías de plomo ácido, debe ser limitada a un mínimo del 20% para evitar el riesgo de sulfatación [10], lo que requeriría una recarga inmediata. Por tanto, se debe establecer un límite de descarga hasta un SOC (State of Charge) del 50% (figura 54-b) para reducir el daño a las baterías y prolongar su vida útil.



a)

b)

Fig. 54. Ajuste de parámetros para carga de batería. a) Parámetros de la función de cargador. b) Establecer el SOC mínimo de descarga de la batería y conectar red eléctrica. Elaboración propia.

3.8.2 Inversor como fuente de energía principal.

En esta etapa se establece el comportamiento de la batería y la entrada de la red eléctrica, lo que nos permitirá determinar cuándo opera con la batería y cuándo con la red eléctrica, definiendo las condiciones en el programa Victron Connect en "*Control de entrada de CA*". La opción I considera los criterios establecidos para la red eléctrica, mientras que las opciones II y III determinan que la desconexión se produzca cuando el consumo sea mayor a 999W y se proteja el equipo de una sobredemanda a los 998W. La potencia establecida es solo experimental y variará dependiendo de la carga y la configuración necesarias.

- I. Conexión condicional de entrada de CA: ON
- II. Conectar cuando la carga sea superior a: 999W
- III. Desconectar cuando la carga sea superior a: 998W
- IV. Conectar cuando SOC caiga por debajo de: 50 %
- V. Conectar cuando la tensión de la batería caiga por debajo de: 23.5V
- VI. Desconectar entrada CA en: Carga inicial finalizada.

Las opciones IV, V y VI establecen en qué momento se realiza el cambio de la fuente de energía desde la entrada de CA a las baterías, una vez que se determina que éstas tienen carga suficiente. En este caso, se espera hasta que termine la carga inicial que corresponde al 85% (según se muestra en la figura 56). Este porcentaje de carga asegura un ciclo de carga y descarga adecuado, lo que extiende la vida útil de las baterías.



Fig. 55. Gráficas de las etapas en la carga de banco de baterías.

El sistema de inversores inicia en modo trifásico para las cargas trifásicas como la BCG y para cargas monofásicas. Se procede a la operación de las cargas en conjunto del sistema de inversores para analizar su comportamiento y mejor configuración, iniciando por la BCG siendo el de mayor interés.

3.8.3 Monitoreo del sistema inversores fotovoltaicos.

El sistema de inversores tiene la opción para visualizar información en tiempo real como estado de las baterías, red eléctrica externa, consumo de la carga, potencia de los paneles fotovoltaicos a través del monitor ColorControl gx, o vía remota por el Victronconnect.

Como se ve en la figura 56, el panel indica el estado actual de operación, y con un consumo de 833W se aprecia que por sí solo los paneles FV son capaces de cubrir la demanda y resto de la energía capturada es enviada al banco de batería mientras el controlador de carga lo permita.



Fig. 56. Información en tiempo real que entrega el panel Color Control GX. Elaboración propia.

Debido que el controlador de carga se encuentra dentro del inversor, no incluye comunicación con el sistema de cable de red del inversor, por lo cual no se podía monitorear la etapa de carga en el lado DC por separado, la potencia de la batería y la potencia de los paneles FV. Pero el panel digital tiene una opción de conectar el controlador de carga por el puerto VE.Direct X



Fig. 57. Cable para datos para enviar información de estado de carga al ColorControl GX. Elaboración propia.

4 Integración sistema FV en secador Geosolar

4.1 Introducción

Se describirán en este capítulo los sistemas eléctricos en funcionamiento, analizando sus componentes, partidas y su funcionamiento en el tiempo. Se llevarán a cabo pruebas y análisis de resultados para caracterizar cada sistema y, así, combinar tecnologías y lograr una mayor eficiencia energética en el proceso.

El objetivo principal es proveer la energía necesaria desde el sistema fotovoltaico a todos los equipos relacionados con la sala de secado. Se evaluarán los beneficios e inconvenientes de conectar las distintas cargas al sistema, y en caso de que no sea posible, se buscará una combinación que permita al sistema operar de manera óptima para finalmente realizarán pruebas de secado de aserrín con el objetivo es completar un ciclo de secado.

4.2 Caracterización de demanda eléctrica.

Durante la etapa de estudio, el objetivo principal fue lograr la integración del sistema fotovoltaico en el sistema de secado. Para alcanzar este objetivo, era fundamental analizar el comportamiento de los equipos y establecer límites y condiciones de operación adecuados. En este sentido, identificamos que la bomba de calor geotérmica (BCG) desempeñaba un papel crucial debido a su alta eficiencia, capacidad para generar calor y tiempo de funcionamiento prolongado..

Con el fin de caracterizar la BCG, se ha llevado a cabo un ensayo en el cual se ha conectado directamente a la red eléctrica. Esto nos ha permitido establecer un perfil de partida y comprender su funcionamiento nominal para futuras comparaciones. Durante el ensayo, se ha colocado sensores de medición estratégicamente ubicados aguas abajo de la protección eléctrica de la BCG en Q1 de la BCG, la cual se encuentra en el tablero TDFyA. Utilizando un analizador de redes Metrel, se ha registrado datos como voltajes, corrientes, potencias y otros parámetros.

Una vez completado el ensayo de partida de la BCG utilizando únicamente la red eléctrica, sin la interferencia del sistema fotovoltaico, se obtuvo las gráficas mostradas en la figura 58. En este ensayo, se consideró que la BCG opera con una tensión trifásica de 380Vrms. Para fines de estudio, nos centramos en analizar únicamente la fase L1 del alimentador eléctrico, ya que, al ser una carga equilibrada, el comportamiento de la fase L1 es representativo de las fases eléctricas L2 y L3.

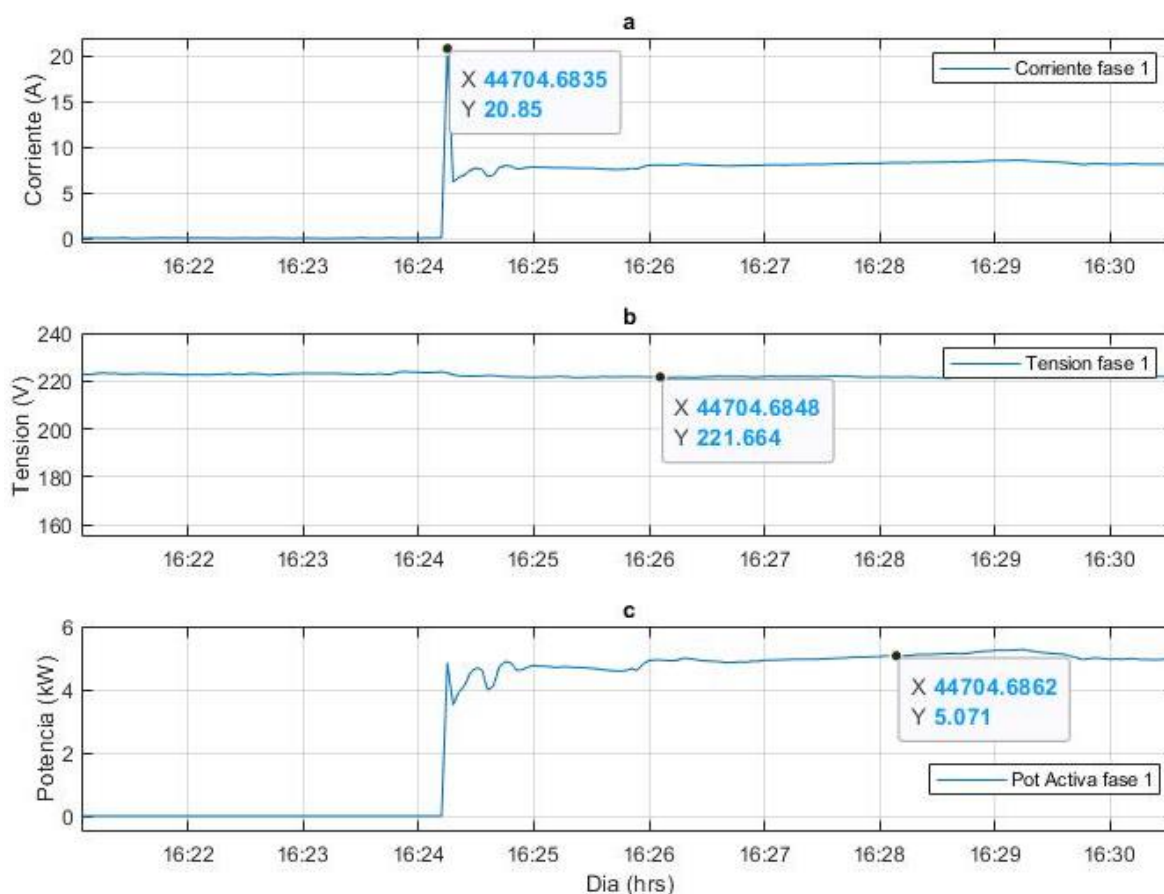


Fig. 58. Gráficas inicio y partida de la BCG de corriente, voltaje y potencia fase L1. a) Corriente en fase L1. b) Tensión en fase L1. c) Potencia Activa en fase L1. Elaboración propia.

Al comparar las gráficas de la figura 58, se puede observar que durante la partida en la fase L1, se produce un incremento significativo en la potencia, alcanzando un valor de 4.95kW debido al aumento drástico de corriente generado por el compresor. A pesar de esto, la caída en la tensión en la gráfica B es mínima, representando únicamente un 1% de reducción gracias a la fortaleza de la barra de distribución a la que se encuentra conectada la carga. Estos resultados indican que la instalación eléctrica es adecuada para la demanda del equipo y la demanda de su partida.

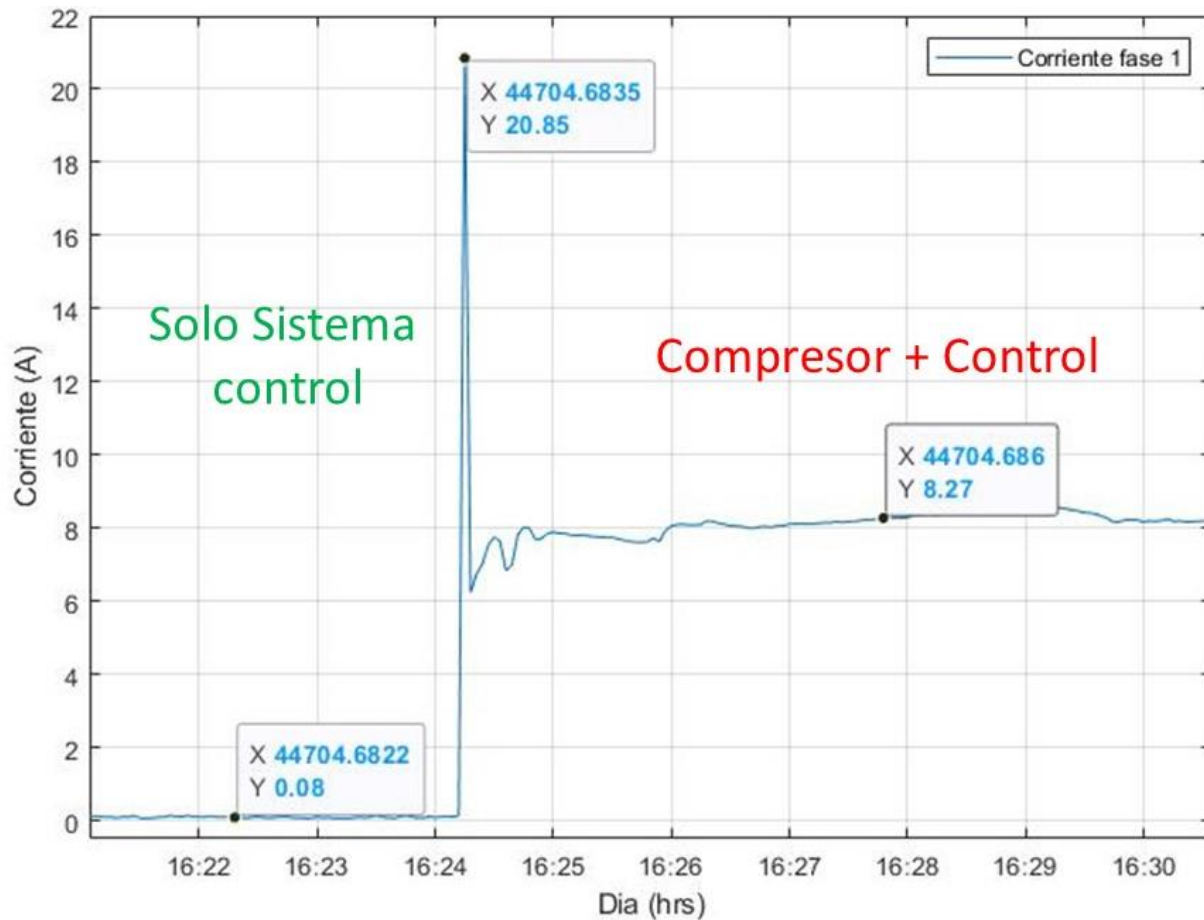


Fig. 59. Gráfica de la partida de BCG. Curva de corriente de fase L1. Elaboración propia.

Si enfocamos en el comportamiento de la corriente en la figura 59, se puede observar un bajo consumo inicial debido al funcionamiento del control lógico del equipo, al que se ha denominado "Solo sistema control". Durante 3 minutos y 10 segundos, el sistema analiza los parámetros para la activación del compresor de gas, manteniendo un consumo promedio de 0.1A. Cuando el control del equipo da la orden de iniciar el sistema, el compresor se activa y se produce un pico de corriente de hasta 20.85A, lo que representa un aumento del 160% respecto a la corriente nominal. Una vez completada la partida, el consumo del compresor se estabiliza en 8.27A, aproximadamente igual al valor nominal.

4.3 Partida de la BCG por medio de inversor solar con red eléctrica.

En esta nueva prueba, se realizó la partida de la BCG utilizando el sistema inversor fotovoltaico como intermediario eléctrico, entregando la potencia desde la red eléctrica. El inversor tiene la capacidad de trabajar con ambas fuentes en modo de apoyo en momentos de alta demanda de potencia (PowerControl o PowerAssist). Sin embargo, no permite un funcionamiento híbrido constante, es decir, no es posible utilizar simultáneamente la red eléctrica y las baterías durante largos períodos. La medición se realizará en el mismo punto que en el caso anterior, enfocándonos únicamente en el consumo de la BCG

En cuanto al suministro de energía, la red eléctrica llega a los inversores, quienes seleccionan la fuente a utilizar según las condiciones. Confirmamos que los inversores no son del tipo "on-grid", lo que implica que no pueden funcionar con la red eléctrica y las baterías al mismo tiempo para inyectar potencia a la carga. Esta información se puede observar en las corrientes de funcionamiento de la tabla 18, donde se indica la potencia proveniente de la red eléctrica y se muestra que las baterías no aportan potencia.

Solo en el caso del modo PowerAssist, cuando se activa y el compresor de la BCG se pone en marcha, el inversor detecta la alta demanda de potencia y, de manera instantánea, inyecta un aporte de potencia desde las baterías a la red eléctrica. Este proceso ocurre en un lapso de tiempo muy breve, y la aplicación registra un consumo de 5A proveniente de las baterías durante aproximadamente 6 segundos, para luego disminuir a 0A.

Tabla 18. Corrientes de entrada, batería y salida del inversor con la BCG funcionando (con compresor).

Fase	Corriente red eléctrica (A)	Corriente batería (A)	Corriente salida inversor (A)	Corriente BCG según Metrel (A)
L1	5.20	0	4.93	5.13
L2	5.40	0	5.18	5.68
L3	5.76	0	5.44	5.86

4.4 Partida eléctrica de la BCG solo con inversor solar.

En este nuevo ensayo, continuamos utilizando el sistema fotovoltaico con el objetivo de alimentar la carga exclusivamente desde las baterías, sin el respaldo de la red eléctrica. Se explorarán dos posibles casos: el respaldo en caso de falla de la red eléctrica y el uso exclusivo del inversor. La carga utilizada seguirá siendo la BCG.

Desde el inicio, se establece que teóricamente no es posible suministrar toda la energía requerida por la BCG a través del sistema fotovoltaico. La suma de las potencias de los tres inversores alcanza un total de 3900W, mientras que la BCG tiene un consumo nominal de 4200W, lo que representa una falta de aproximadamente un 7.15% de potencia en los inversores. Además, no se tiene en cuenta el pico de corriente de partida que requiere una mayor potencia de la fuente.

A pesar de esta limitación, se llevará a cabo una prueba siguiendo todas las medidas de seguridad y protección de los equipos, con el objetivo de observar el comportamiento en caso de sobrecarga.

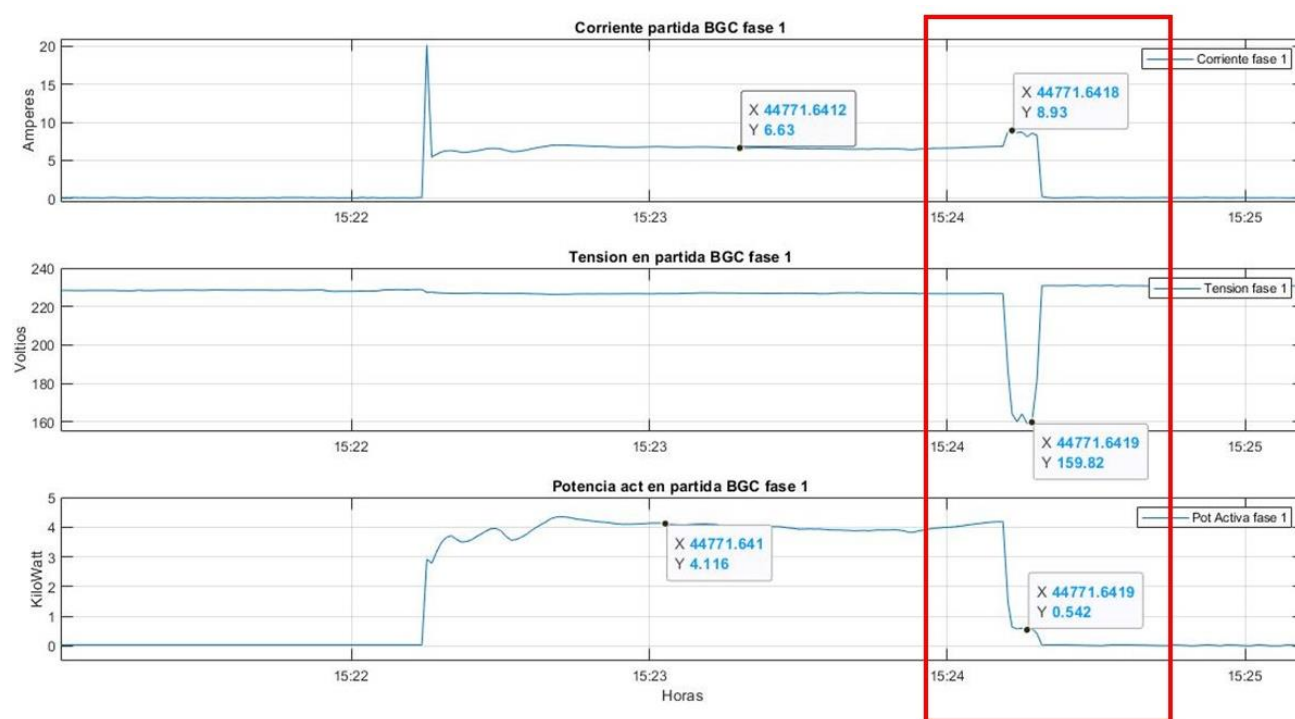


Fig. 60. Curvas de corriente, tensión y potencia activa, cambio de suministro de la BCG de la red a sistema del inversor en recuadro rojo. a) Corriente partida BGC fase L1. b) Tensión en partida BGC fase L1. c) Potencia activa en partida BGC fase L1.

En el primer caso, se lleva a cabo la prueba con el sistema configurado en modo de respaldo de suministro mediante las baterías. Esto implica que, al interrumpirse el suministro de la red eléctrica, el sistema fotovoltaico asume la tarea de suministrar energía. El desarrollo de la prueba se muestra en la figura 60.

Inicialmente, el sistema está conectado a la red eléctrica a través del inversor. En el minuto 4, se pone en marcha el compresor, lo que genera un pico de corriente. Posteriormente, la corriente se estabiliza en un promedio de 7A, dentro de los parámetros nominales. A continuación, se interrumpe la conexión con la red eléctrica y el inversor suministra de manera instantánea el 100% de la energía requerida para la BCG desde las baterías. En el recuadro rojo de la figura, se observa un breve aumento en la corriente de 0.3A, seguido de una disminución rápida. Esto se debe a que la demanda de potencia supera la capacidad del sistema fotovoltaico, lo que ocasiona una caída brusca en el voltaje y, como resultado, la potencia se reduce al mínimo. Este comportamiento se identifica como una sobrecarga durante unos segundos, tras lo cual se desconecta la carga.

Estos resultados confirmaron lo previsto en cuanto a la falta de compatibilidad entre las potencias. Durante la prueba, se observa un comportamiento anormal causado por la sobrecarga, la cual provoca una caída intermitente de tensión de alta frecuencia que no puede ser registrada. En consecuencia, en el momento de la caída de tensión, el contactor interno de la BCG abre sus contactos para permitir que la tensión vuelva a los valores nominales, lo que a su vez provoca la reconexión del contactor. Este ciclo se repite sucesivamente hasta interrumpir la alimentación por razones de seguridad.

El mismo efecto de apertura y cierre del contactor se presenta al utilizar los inversores sin la red eléctrica y con partida, ya que no logran soportar el pico de corriente de partida. Por lo tanto, no es posible utilizar los inversores en ninguna configuración junto con la BCG. Esto lleva a la conclusión de que la BCG debe funcionar directamente conectada a la red eléctrica.

4.5 Inversor solar como suministro eléctrico para cargas complementarias de la BCG.

Con base en las limitaciones identificadas respecto a la operación del sistema inversor con la BCG, se ha tomado la decisión de suministrar energía a las cargas complementarias utilizando los inversores, mientras que la BCG permanecerá conectada únicamente a la red eléctrica, asegurando así un arranque sin problemas. Los inversores tienen la capacidad de operar en modo trifásico o monofásico reforzado, y se realizarán pruebas en ambos modos para garantizar su correcto funcionamiento.

El sistema geotérmico depende del funcionamiento de tres bombas de agua que operan en circuitos cerrados y separados, así como de ventiladores encargados del intercambio de calor en la sala de secado. Estos equipos se consideran cargas lineales y tienen un funcionamiento continuo en comparación con la BCG, que suele tener una operación intermitente en períodos de tiempo más largos.

4.5.1. Salida de la energía de los inversores en modo trifásico.

Se realiza la prueba con los inversores en modo trifásico ya que los tableros son trifásicos, alimentan las cargas complementarias que son: tres bombas recirculantes de agua, el ventilador centrífugo del aerotérmico INGERO y el ventilador FanCoil. Cada uno de ellos con potencias establecida en la tabla 19, tiene un comportamiento de forma lineal con largos ciclos de operación. Todos están conectados a la misma barra de distribución en el tablero TDFyA.

Tabla 19. Potencias cargas complementarias BCG y techo aerotérmico.

Carga	Valor
Bomba agua 1 unid	220 W
Ventilador techo	180 W
FanCoil BCG	136 W

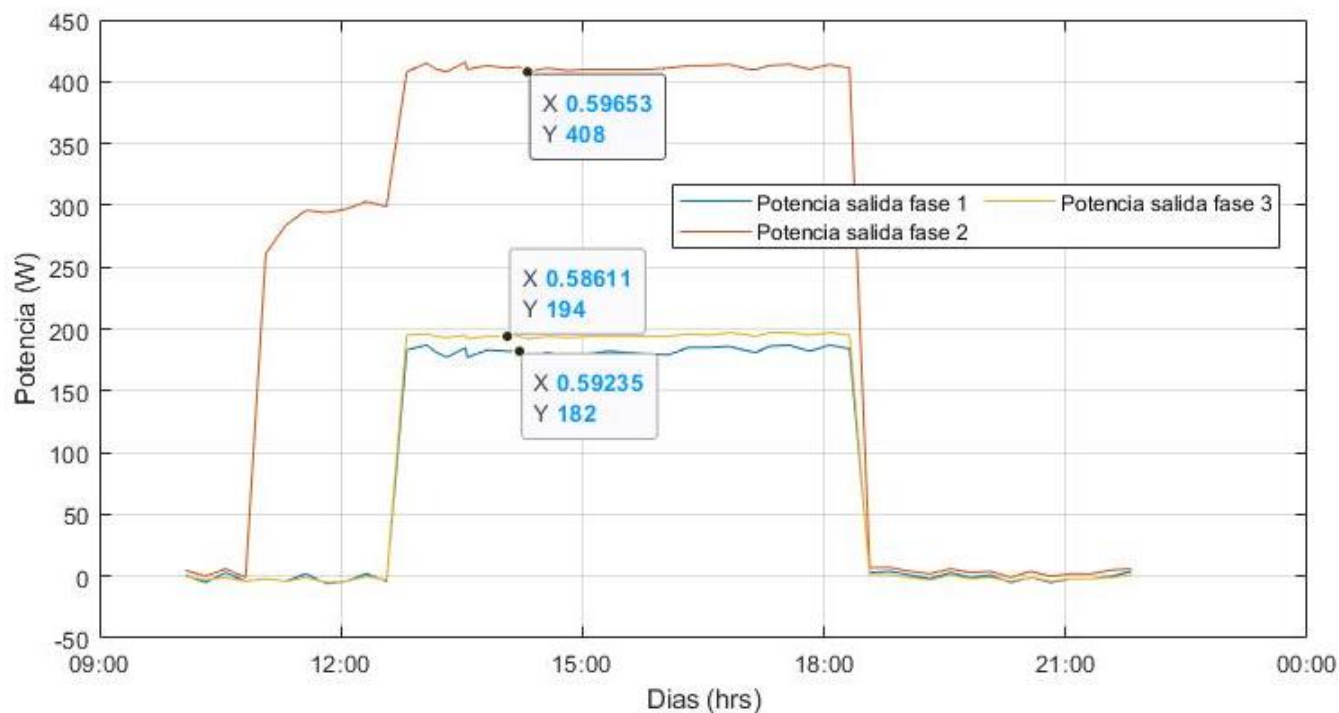


Fig. 61. Potencia salida desequilibrada de inversor en modo trifásico.

En el registro proporcionado por el sistema VRM de los inversores, se puede observar en la figura 61 que las potencias se miden por fase. Es evidente que la fase L2 presenta una mayor demanda en comparación con las fases L1 y L3. La potencia media de la fase L2 es de 403W, mientras que las fases L1 y L3 tienen un promedio de 182W y 194W, respectivamente. Esto crea un desequilibrio entre las fases y una carga desproporcionada en un solo inversor, lo que representa un problema para los equipos y puede llevar a la desconexión de los inversores al sobrecargar un inversor en particular.

En caso de producirse un pico de potencia, el sistema de control de los inversores detectará este desequilibrio y activará una alarma de desequilibrio en un corto período de tiempo. Esta situación se debe a que las bombas de agua de la BCG están conectadas, una en cada fase, lo que logra un equilibrio de carga. Sin embargo, el ventilador del techo aerotérmico UCSC y el FanCoil están conectados a un enchufe ubicado dentro de la sala de secado, lo que significa que ambas cargas (FanCoil y ventilador centrífugo) están conectadas únicamente a la fase L2.

4.5.2. Salida de la energía de los inversores en modo monofásico reforzado.

En este caso, se puede llevar a cabo la configuración deseada, ya que la única carga trifásica es la BCG, mientras que el resto de las cargas son monofásicas. Para implementar el modo monofásico reforzado con los tres equipos trabajando en conjunto con una fase de salida, es necesario realizar las siguientes conexiones:

- **Salida de los inversores:** La fase OUT 1 de cada inversor se conectará con las fases OUT 1 de los otros inversores, dejando solo una fase en común como salida. El neutro seguirá siendo común entre ellos.
- **Red eléctrica:** Solo se utilizará una fase (Fase 1) de las barras de distribución para la alimentación general del laboratorio. Esta conexión se realizará en paralelo con las fases de salida de cada inversor. En cuanto al neutro, al ser común, no sufrirá modificaciones.

El sistema, con los tres inversores en modo paralelo compartiendo las cargas en una sola fase, requirió realizar modificaciones en el tablero TDFyA del laboratorio que controla los equipos. Se ajustaron la conexión del alimentador desde los inversores, pasando de un sistema trifásico a un sistema monofásico, utilizando únicamente la fase L1. Las tres barras del sistema trifásico se unieron a una sola fase de alimentación, donde se ubicará el tablero en modo monofásico, manteniendo todas sus protecciones en correcto funcionamiento. Y solo dejando la BCG con alimentación trifásica directa a la red eléctrica con su protección eléctrica.

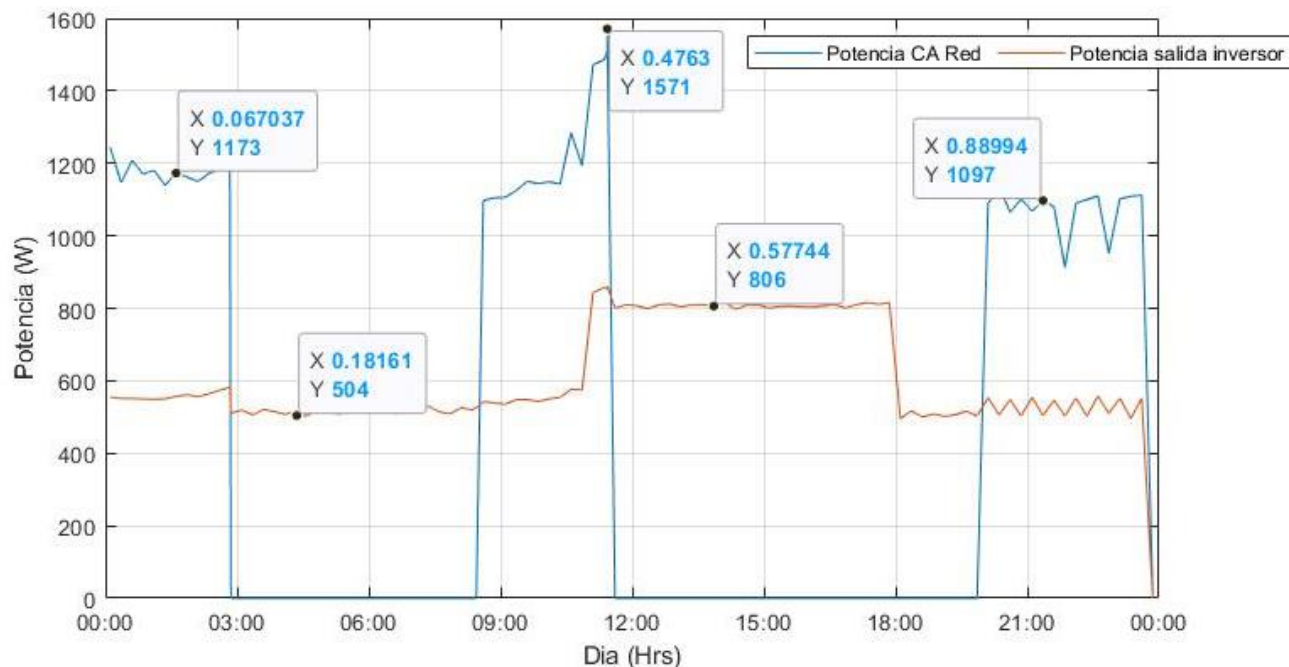


Fig. 62. Gráfica de las potencias de entrada (red eléctrica) y salida de los inversores en modo monofásico.

La figura 62 presenta los resultados de una prueba de 24 horas del sistema en modo de funcionamiento monofásico. Durante este período, las cargas utilizadas consisten en las 3 bombas externas del BCG, que operan de forma continua, y el ventilador centrífugo, controlado por un temporizador eléctrico que se activa a las 11:00 h y se apaga a las 18:00 h. Esto se hace para aprovechar el horario con la mejor radiación solar, que es beneficioso para el techo aerotérmico de la UCSC.

Se puede observar que la potencia de entrada proveniente de la red eléctrica se conecta al sistema en 3 ocasiones durante el día, con una duración promedio de 3 horas durante el día y 4 horas durante la noche. La potencia de entrada tiene un valor promedio de 1200W y alcanza un pico de 1500W por la partida del motor centrífugo detectado por el sistema. Esta conexión ocurre cuando las baterías se descargan por debajo del 50% y la red eléctrica entra en acción para suministrar energía a las cargas y ayudar en la recarga de las baterías. El consumo de energía de las baterías tiene una duración aproximada de 5 horas durante la noche, mientras que durante el día puede llegar a ser superior a 8 horas, gracias a la potencia generada por los paneles fotovoltaicos. Es importante destacar que la salida del inductor siempre se mantiene operativa.

Tabla 20. Registro salida de la corriente para distintos casos de carga desde el inversor.

Carga	Inversor 1	Inversor 2	Inversor 3	Total
3 bombas	0.7	0.7	0.7	2.50 A
3 bombas + ventilador	1.2	1.2	1.15	4.0 A
3 bombas + ventilador + FanCoil	1.4	1.4	1.35	4.3 A

Al momento de conectar las cargas complementarias se registran las corrientes de la salida de los inversores con una pinza de corriente de inducción para corroborar las corrientes, notando que la salida de cada inversor entrega una corriente similar para la demanda total, siendo una distribución equilibrada en su salida para así en cada caso de la tabla 20.

Tabla 21. Demanda de la batería en distinto caso de cargas.

Carga	Corriente DC	Potencia DC
3 bombas	26.4 A	662 W
3 bombas + ventilador	39.5 A	977 W
3 bombas + ventilador + FanCoil	44.0 A	1113 W

Lo mismo se hace en la tabla 21, midiendo la corriente desde el alimentador de las baterías, siendo las demandas en los distintos casos con una tensión promedio de 25.0V DC considerando el rango de carga de la batería.

Mientras la carga permanece conectada a los inversores, las baterías entran en un ciclo de carga y descarga preconfigurado. La recarga de las baterías se realiza a través de la red eléctrica y los paneles fotovoltaicos. Si hay potencia excedente generada por los paneles, se utiliza para recargar las baterías, lo que prolonga su duración. El ciclo de carga y descarga de las baterías se establece en un rango que va desde el 50% hasta el 85% de su capacidad. Para la etapa de absorción de la carga, se han definido los siguientes parámetros:

- Tiempo máximo de absorción: 8 horas.
- Voltaje máximo de absorción: 27.3 VDC.
- Tiempo entre ciclos de absorción: 1 hora.
- Finalización de la recarga: etapa de absorción de la batería.

Se ha observado que, con la configuración inicial, el tiempo de carga superaba las 8 horas establecidas, alcanzando solo entre el 80% y el 88% de carga. Además, se requería un período de pausa de 1 hora antes de reiniciar el ciclo. Esto ocurría cuando se utilizaba el criterio de finalización de la recarga en flotación con un porcentaje de carga superior al 90%, lo que no cumplía con los criterios establecidos y resultaba en la carga permanente de la red eléctrica. Por lo tanto, se ha optado por utilizar la etapa de absorción hasta el 85% de carga, lo que ha permitido cambiar de la alimentación de red eléctrica a la alimentación de batería por parte de los inversores.

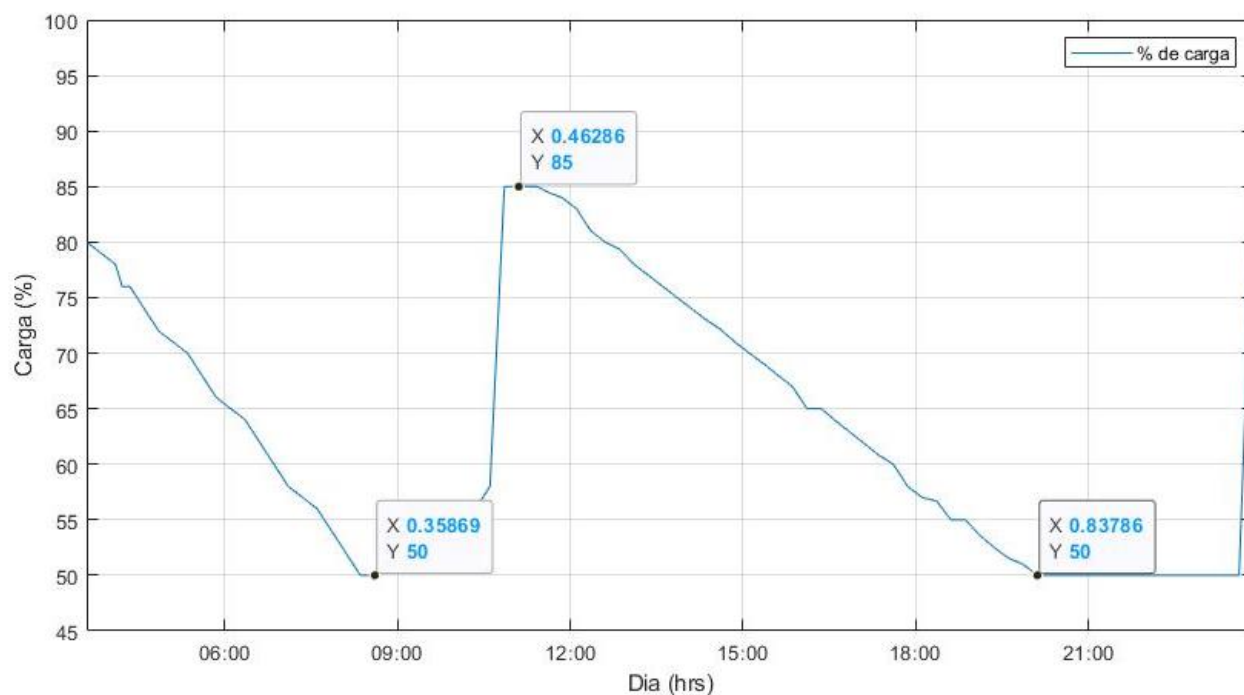


Fig. 63. Gráfica del estado de carga (SOC) del banco de batería durante operación.

El comportamiento del banco de baterías en funcionamiento, como se muestra en la gráfica figura 63, revela un ciclo de funcionamiento en comparación con los casos anteriores, manteniendo el Estado de Carga (SOC) entre el 50% y el 85% de capacidad, tal como se estableció en las configuraciones previas. La recarga de las baterías se realiza utilizando tanto la red eléctrica como los paneles fotovoltaicos durante el día, mientras que durante la noche se utiliza exclusivamente la red eléctrica.

Se observa claramente el aporte de los paneles fotovoltaicos durante el día, lo cual prolonga la duración de las baterías en el tiempo. Es importante destacar que durante este horario también se encuentra en funcionamiento el ventilador centrífugo, lo que aumenta el consumo energético. Por el

contrario, durante la noche se registra un consumo más bajo debido a la ausencia de luz solar y la exclusiva utilización de la red eléctrica.

El comportamiento de descarga de las baterías muestra una tendencia casi lineal, en consonancia con el comportamiento de la carga lineal. Esto demuestra una buena sincronización entre el suministro de energía y la demanda, lo que contribuye a un rendimiento eficiente del sistema.

En resumen, el banco de baterías presenta un ciclo de funcionamiento adecuado, manteniendo el SOC dentro de los rangos deseados. La combinación de la recarga mediante paneles fotovoltaicos y la red eléctrica permite un uso óptimo de la energía, con un comportamiento de descarga lineal acorde con las cargas aplicadas. Estos resultados respaldan la eficiencia y la efectividad del sistema de almacenamiento de energía utilizado.

Las cargas que alimenta el inversor son 3 bombas de agua, un extractor de aire del sistema aerotérmico UCSC y un ventilador FanCoil.

Tabla 22. Resumen consumo potencia cargas existente en sala secado.

Carga	Consumo	
Ventilador centrífugo	312	Wh
FanCoil	130	Wh
3 bombas agua	524	Wh
Total	966	Wh

Considerar que el FanCoil y las 3 bombas de agua pueden llegar a estar funcionando las 24 horas del día, durante el tiempo que tome el secado, considerando que el ventilador centrífugo solo opera en un rango de tiempo donde se concentra la mayor radiación solar, con una duración de 7 horas. Entonces el consumo de energía durante un día es:

$$((\text{Ventilador centrífugo} * 7 \text{ hrs}) + (\text{FanCoil} + \text{Bmb de agua}) * 24 \text{ hrs}) = 17.88 \text{ kWh} \quad (1.2)$$

En conclusión, en un día de secado se reduce el consumo energético en 17.88kWh de la red eléctrica traduciéndose en un ahorro económico, ya que es utilizada la energía verde de los inversores para el suministro de las cargas.

5 Ensayos de secado

5.1 Introducción.

Dentro de la sala de secado, se llevó a cabo una evaluación del proceso de secado controlado utilizando exclusivamente los sistemas Aerotérmicos UCSC y Grammer. Debido al mencionado error 32, se incluirá la BCG en la evaluación.

Se decidió utilizar aserrín de pino como material de secado, el cual fue obtenido de un aserradero local en noviembre de 2022. Se establecieron 4 métodos diferentes para distribuir el aserrín en la sala de secado, con el objetivo de evaluar su eficacia en el proceso de secado.

5.2 Ensayo de secado.

Para llevar a cabo la prueba de secado, disponemos de las fuentes de calor, pero no contamos con un método específico para almacenar la biomasa dentro de la sala. Por tanto, es importante establecer una forma de contener el material, ya que esto puede afectar el proceso de secado debido a las diferentes propiedades de aislamiento, permeabilidad o accesibilidad de los materiales. Se presentan 4 tipos de contenedores propuestos, basados en lo que se encuentra comúnmente en zonas rurales y que presentan diferentes características. A continuación, se describen:

- 1. Directo en el piso (Piso):** Esta es la forma más simple y menos elaborada, donde el aserrín se coloca directamente sobre el piso. Esta superficie tiene una baja humedad. Ver Figura 64-a.
- 2. Sobre una lámina de metal (Metal):** En este caso, se utiliza una lámina de metal para evitar la transferencia de humedad entre el piso y el aserrín. El aserrín se coloca sobre esta lámina, quedando expuesto al ambiente por encima. Ver Figura 64-b.
- 3. Dentro de una bandeja contenedora:** En este método, el aserrín se coloca dentro de una bandeja con rendijas en todos sus costados y pequeñas perforaciones en la base. Esto permite una expulsión libre de la humedad. Ver Figura 65-a.
- 4. Saco plástico (Saco):** Se utiliza un saco plástico con medidas de 60 x 90 cm. La superficie del saco es de plástico delgado entretejido, lo que permite la eliminación de la humedad a través de toda su superficie. Este formato es comúnmente utilizado en el sector rural para el almacenamiento y venta del aserrín. Ver Figura 65-b.

Para realizar una comparación en el proceso de secado, se utilizará una muestra idéntica al formato del saco plástico, pero ubicada en el exterior del laboratorio. Esta muestra experimentará un secado pasivo y estará expuesta a los elementos ambientales. Esto permitirá comparar el proceso de secado del aserrín tanto en un ambiente natural como en una sala controlada.

En el experimento se realizó en la sala de secado durante 8 días al inicio de verano, se controlarán los siguientes parámetros: peso (kg), temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y porcentaje de humedad superficial y en el centro de las muestras (%). Este último parámetro se medirá utilizando un higrómetro. Cada muestra tendrá la misma humedad y peso inicial de 12.5 kg. La altura de las muestras variará dependiendo del formato del contenedor, considerando si tiene paredes o no, y su área. Se buscará que los formatos de las muestras 1 y 2 sean lo más similares posible para garantizar la homogeneidad de los resultados y para los casos 3 y 4 por su forma no es posible mantener una altura igual.



Fig. 64. Muestras aserrín para ensayo de secado. a) En contactor con el piso. b) Sobre lamina metal.



Fig. 65. Muestras aserrín para ensayo de secado. a) Bandeja plástico frutas. b) Saco plástico.

Durante un período de 8 días iniciando el 1 de diciembre y finalizando el 8 de diciembre, se realizaron el secado de las muestras en la sala utilizando el sistema aerotérmico Grammer. Este sistema estuvo activo diariamente y se iniciará únicamente cuando haya radiación solar disponible. La duración aproximada de funcionamiento será de 14 horas al día. Además, se ha configurado el aerotérmico UCSC para que funcione desde las 11:00 h hasta las 19:00 h, aprovechando el clima exterior registrado en la tabla 23, con temperaturas que oscilan entre 13°C y 24°C. Esta configuración se ha implementado para evitar la entrada de aire húmedo al sistema, ya que el aire será previamente calentado antes de ser introducido en la sala de secado.

Tabla 23. Parámetro para caracterización del clima entre el 1 al 8 de diciembre 2022, en los cuales se realizaron las pruebas de secado [9].

Variable	Min	Max	
Temperatura promedio	6	24	°C
Promedio horas luz natural	14	14	h
Velocidad viento	8	17	km/h
Probabilidad precipitaciones	8	8	%
Nubosidad	10	20	%
Promedio mensual lluvias	18	21	mm

Mediante el uso de un higrómetro, podremos medir el porcentaje de humedad presente en las muestras, lo que nos permitirá monitorear el proceso de secado. Se realizarán mediciones tanto en la superficie como en el centro de las muestras, para tener un registro del comportamiento durante el secado.

Durante los primeros días, se puede observar una disminución significativa de la humedad en la superficie del aserrín, llegando a niveles cercanos al 5% en el segundo día y 0% desde el cuarto al octavo día. Sin embargo, se ha notado que el interior de la muestra mantiene un porcentaje de humedad que es mucho más alto, alrededor del 24%, lo cual no es de fiarse de la medición de la superficie como valores representativos de la muestra. Por esta razón, se ha decidido enfocarse únicamente en los valores de humedad del interior de la muestra, ya que representan de manera más precisa la evolución del secado.

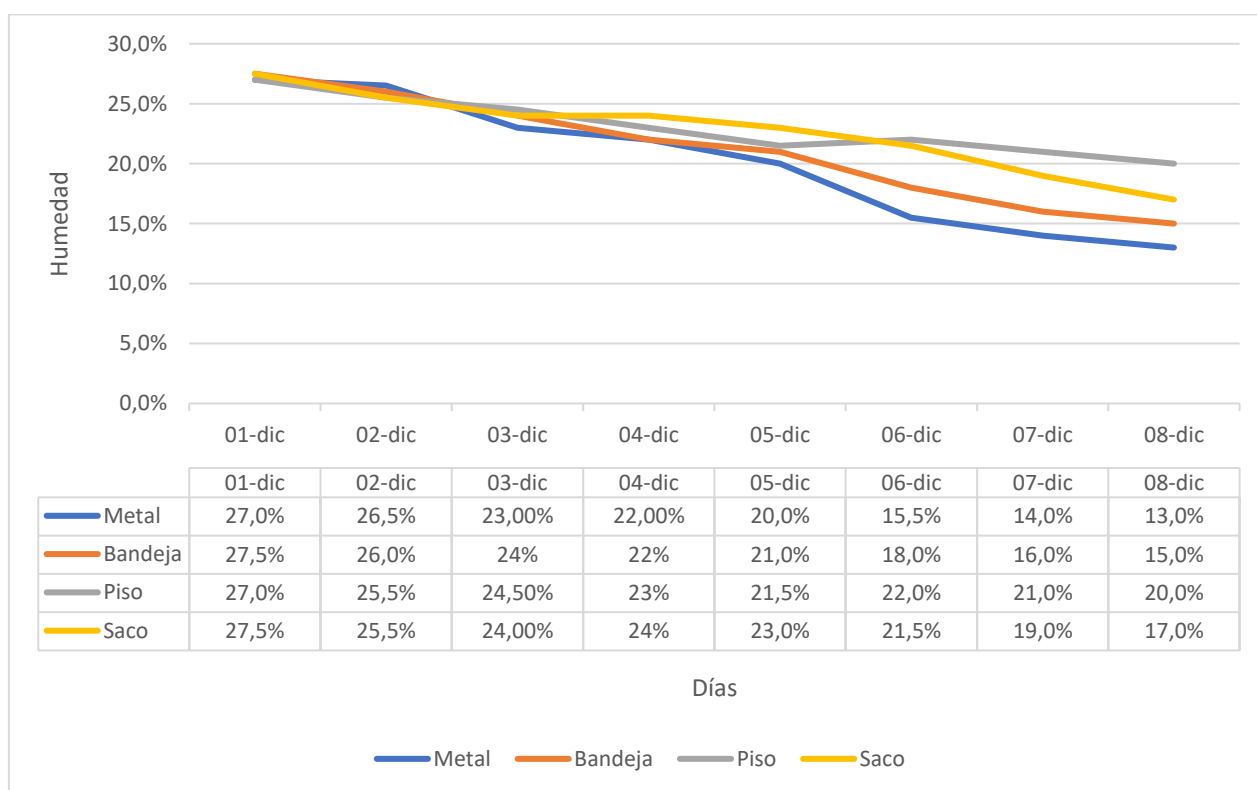


Fig. 66. Gráfica de la humedad del centro de las 4 muestras en la sala de secado durante los 8 días.

Al inicio del ensayo se realiza una comparación de la humedad en el tiempo, las muestras de aserrín ingresan a la sala de secado con un nivel de humedad inicial del 27% \pm 5% y un peso de 12.5 kg cada una, en diferentes formatos de almacenamiento. Se garantiza una distribución uniforme de las muestras con respecto a las fuentes de calor presentes en la sala. A lo largo de los días, se observa una reducción gradual en el contenido de humedad de las muestras, con una disminución inicial de aproximadamente un 2%.

Como se aprecia en la figura 66 se muestra el progreso de secado. Sin embargo, en el sexto día, se detecta una variación en el proceso de secado. La muestra colocada directamente sobre el piso muestra una reducción de humedad más lenta, alcanzando un nivel del 20%. Esto se debe a que el piso retiene humedad y afecta la pérdida de calor, ralentizando el secado.

Las muestras en la bandeja plástica muestran los mejores resultados, con una reducción de humedad del 15%. Las rendijas en las paredes de la bandeja permiten una mayor exposición del aserrín al aire caliente, facilitando la evaporación de la humedad. Además, al no estar en contacto directo con el piso, se evita una disminución significativa de temperatura.

La muestra sobre la lámina de metal alcanza un nivel de humedad del 13%. Al igual que la muestra en la bandeja plástica, evita el contacto directo con el piso y mantiene una temperatura más constante. Además, al estar distribuida de manera más uniforme, se favorece la transferencia de humedad hacia el exterior, lo cual es crucial en el proceso de secado.

En resumen, los resultados indican que todas las muestras experimentan un secado efectivo a lo largo de los 8 días. Sin embargo, las muestras en "Metal" y "Bandeja" muestran una mayor eficiencia en el proceso, mientras que las muestras en "Piso" y "Saco" presentan una disminución más lenta de la humedad. Estos hallazgos son útiles para mejorar el proceso de secado y determinar la disposición más eficiente del aserrín.

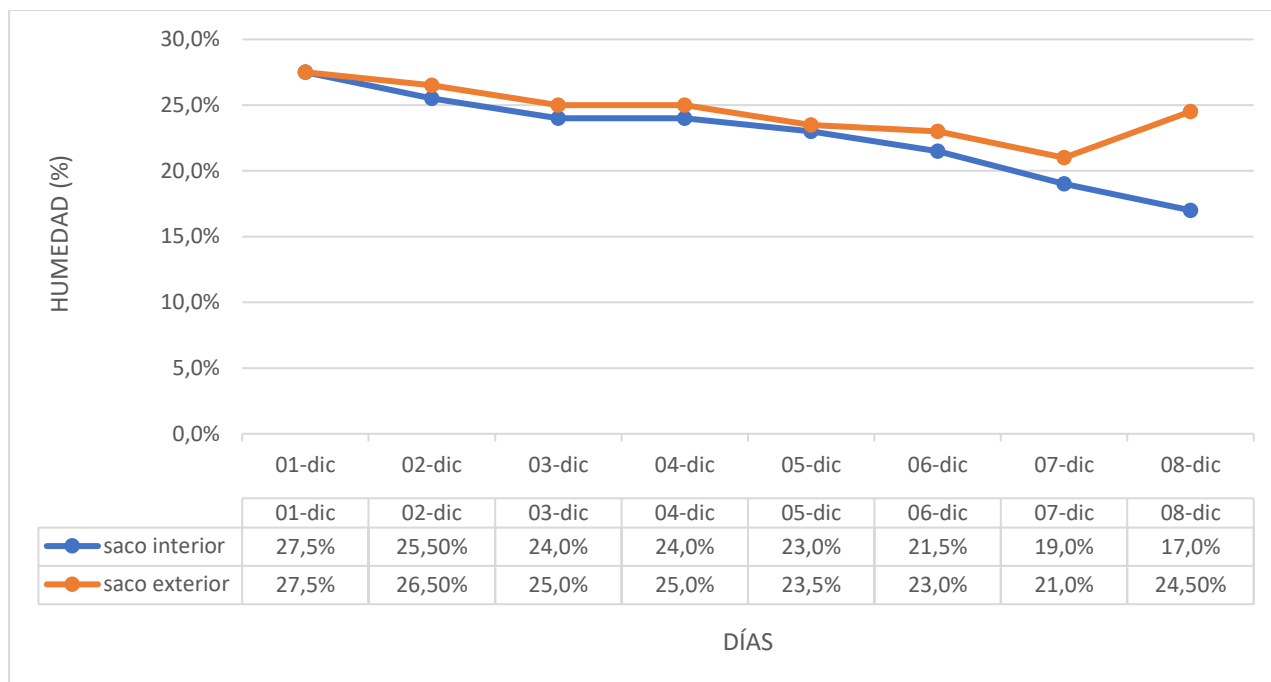


Fig. 67. Gráfica de comparación del porcentaje de la humedad del secado de los sacos interior y exterior.

La Figura 67 ilustra el progreso del secado comparando dos muestras de aserrín en formato de saco: una ubicada en el interior de la sala de secado y otra colocada en el exterior, expuesta a las condiciones ambientales para fines de comparación entre el método controlado y el método tradicional al ambiente.

En el caso del saco de interior, se beneficia de la alta temperatura promedio de 55°C en la sala de secado. Se observa que, a partir del quinto día, se produce una pérdida de agua más significativa, evidenciada por una pendiente cada vez más pronunciada en la gráfica.

Por otro lado, el saco colocado en la exterior muestra un comportamiento similar al del saco de interior hasta el cuarto día, debido a la temperatura ambiente promedio de 23°C y a la ventilación proporcionada por el viento, con una velocidad promedio de 13.5 km/h. A partir del cuarto día, la reducción de humedad en el saco exterior se vuelve más lenta, lo cual se atribuye a la formación de rocío durante las madrugadas. En el octavo día, el saco exterior experimenta un aumento significativo en la humedad debido a las precipitaciones, lo que resulta en un incremento del tiempo de secado.

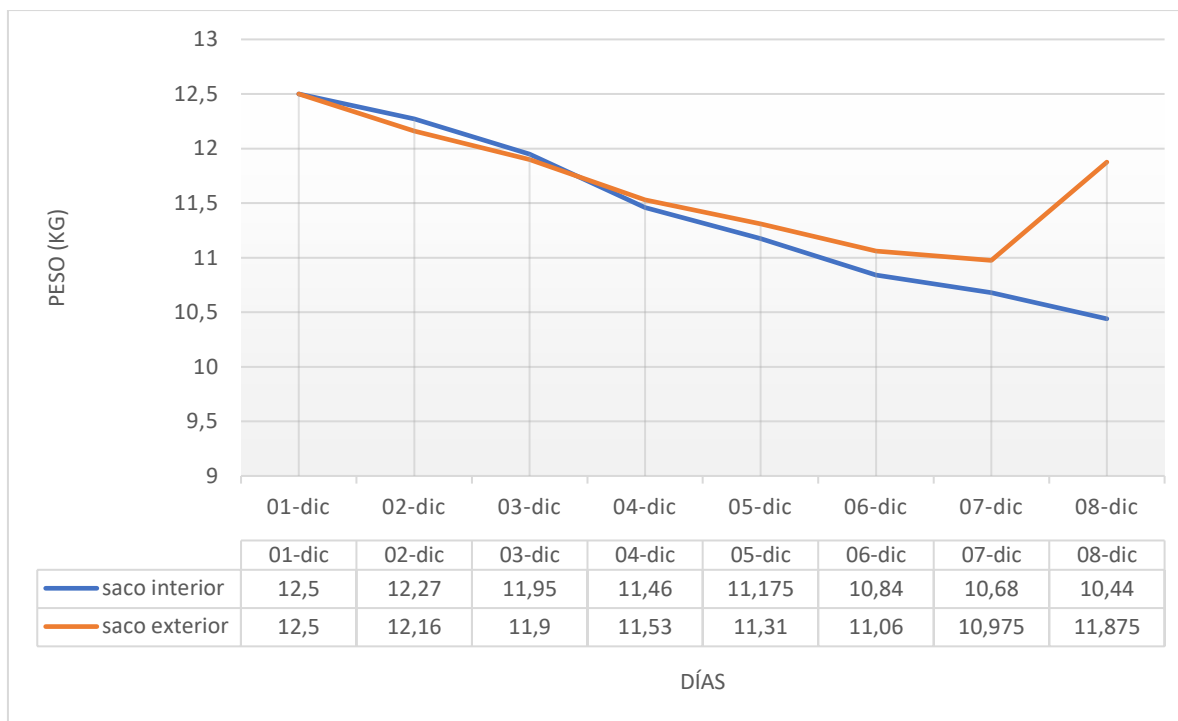


Fig. 68. Gráfica comparativa los pesajes de las muestras sacos de aserrín del exterior e interior.

En cuanto al peso de los sacos, se observa un patrón similar al gráfico anterior del porcentaje de humedad. El saco colocado en la interior muestra una reducción de peso de 2.06 kg (Tabla 25), correspondiente únicamente al agua evaporada durante el proceso de secado. En el caso del saco exterior, debido a una lluvia ligera en el último día, se registra un aumento de peso de 900 g, causado únicamente por la penetración de agua en la muestra. Es importante destacar que el material del saco es de plástico, lo cual ayuda a repeler gran parte del agua que cae sobre la muestra.

Tabla 24. Resumen de los pesajes del secado de las muestras saco interior y saco exterior.

Muestra	Peso inicial	Peso final	Humedad	pérdida
Saco interior	12.5	10.44	Kg	16.48 %
Saco intemperie	12.5	11.875	Kg	5 %

En resumen, tanto la gráfica como el peso de los sacos reflejan los efectos del entorno en el proceso de secado. El saco colocado en el interior se beneficia de la alta temperatura en la sala de secado, mientras que el saco exterior se ve afectado por las variaciones climáticas, como la formación de rocío y la lluvia, que alteran el tiempo de secado y la pérdida de humedad.

Tabla 25. Muestras de secado en distintos tipos de maderas de muestras a pequeña escala.

Tipo de muestra	Peso inicial	Peso final		Humedad pérdida	
Liquidámbar (ramas y hojas)	205	121.3	g	41	%
Álamo (ramas y hojas)	25.1	24.6	g	2	%
Zarzamora	96.9	67.5	g	30	%
Tilo (ramas y hojas)	87.3	49.3	g	44	%
Arce (ramas y hojas)	230.8	120.6	g	48	%

Caso distinto demuestra que el ensayo de secado de biomasa en porciones más pequeñas en la tabla 25, siendo entre ramas y hojas verdes, considerando casos que están mojadas por la lluvia. Se obtienen resultados bastante mayores en reducción de humedad logrando perder hasta el 48% de su peso original, en comparación al secado del aserrín. Esto se debe a que, al ser montones de ramas y hojas, se producen espacios en su interior permitiendo la circulación de aire por toda la muestra, además de su bajo volumen que permite fácilmente la evaporación de la humedad de todas sus superficies. Los casos de baja pérdida de humedad se deben a que son ramas de baja humedad o relativamente seca, liberando poca de esta misma.

El uso de sistemas aerotérmicos para el secado de aserrín demuestra ser una opción de bajo costo y libre de emisiones de CO₂. Sin embargo, su eficiencia se ve afectada por las condiciones climáticas, siendo más efectivo en días despejados donde se puede aprovechar al máximo la radiación solar para la generación eléctrica y el calentamiento del aire. Caso contrario es el sistema de BCG en el cual la operación es mucho más estable sin ser afectado por el clima en grandes rasgos, pero con un costo energético.

La utilización de una sala de secado presenta grandes beneficios en el proceso, como se puede apreciar en el día 8, donde se observa una clara diferencia en el porcentaje de humedad entre los sacos que se encontraban en la sala de secado y las muestras expuestas a las inclemencias del clima y las lluvias. Esta diferencia de 7.5% se traduce en una pérdida de agua de 900 g, lo que resulta en un producto más seco. El impacto del clima a escala industrial podría generar pérdidas significativas para el proceso.

La forma de apilar el aserrín dentro de la sala es un factor importante para mejorar los resultados. Como se observó en el caso de la muestra sobre la lámina de metal, el centro del aserrín es la parte más difícil de secar debido a su compactación, lo que dificulta la salida de la humedad y el flujo del aire. Reducir la distancia entre el centro y la superficie del material aumenta la velocidad de secado. Esto se ve respaldado por los resultados de las muestras de ensayo, donde las estructuras

rígidas permiten la existencia de conductos de aire, facilitando la penetración del aire caliente y la evaporación de la humedad, lo que conduce a mejores resultados en menos tiempo.

6 Conclusiones

6.1 Conclusiones

Tras realizar un análisis exhaustivo de reconocimiento y caracterización eléctrica de las diversas fuentes de calor en el laboratorio de secado Geosolar, que incluye la bomba de calor geotérmica y los sistemas aerotérmicos UCSC y Grammer, en combinación con el sistema fotovoltaico para suministro de energía renovable, se obtienen las siguientes conclusiones:

No es factible cubrir la totalidad de la demanda eléctrica de los sistemas generadores de calor mediante el sistema fotovoltaico. La carga más grande, que corresponde a la bomba de calor geotérmica, consume más energía de la que el sistema fotovoltaico puede generar, superando su capacidad en un 2.5%. Esto representa una limitación en el sistema. Sin embargo, como medida para reducir los costos de operación, se implementa el suministro de energía del sistema fotovoltaico a las cargas paralelas, como las bombas de agua recirculante y el sistema aerotérmico UCSC, lo que reduce el consumo en 940 W/h.

La bomba de calor geotérmica presenta una falla del sistema identificada como el error 32, que afecta la transferencia de temperatura en las tuberías intercambiadoras de calor debido a un coeficiente de transferencia de calor ineficiente entre la tierra y las tuberías. Este fenómeno indica que la superficie de intercambio de calor requerida para una demanda térmica determinada depende de la conductividad térmica del medio, siendo distintas para cada medio. Por ejemplo, la conductividad térmica del suelo arcilloso seco se encuentra entre 0.25 - 0.3 W/mK, mientras que la conductividad térmica del agua es de 0.6 W/mK. Esto significa que el agua tiene una conductividad térmica de 2 a 2.5 veces mayor que la del suelo arcilloso seco. Por lo tanto, se recomienda instalar intercambiadores de calor de la bomba geotérmica cerca o dentro de cuerpos de agua, ya que actúan como conductores de calor más eficientes entre la tierra y las tuberías intercambiadoras de calor.

El banco de baterías muestra un ciclo de funcionamiento adecuado, manteniendo el estado de carga (SOC) dentro de los rangos deseados. La combinación de la recarga mediante paneles fotovoltaicos y la red eléctrica permite un uso óptimo de la energía, con una descarga lineal acorde con las cargas aplicadas. Estos resultados respaldan la eficiencia y efectividad del sistema de almacenamiento de energía utilizado.

Se determina que la forma de almacenamiento sobre la lámina de metal en la sala de secado ha demostrado ser la más efectiva en la reducción de humedad. Esta distribución facilita un mayor contacto con el aire caliente y una mejor aislación impermeable con el suelo. Se destaca la importancia del almacenamiento adecuado del material en la sala de secado, ya que esto tiene un impacto directo en la homogeneidad del secado y en el tiempo necesario para obtener un producto seco. Se recomienda disminuir la distancia entre la superficie y el centro de la muestra, lo cual mejora la eficiencia del proceso de secado. Estas conclusiones resaltan la relevancia de un manejo y diseño adecuados de la sala de secado para obtener resultados óptimos en la reducción de humedad y en la calidad del producto final.

Durante el proceso de secado, se logró una reducción significativa de humedad en la muestra de saco de plástico ubicada en el interior de la sala de secado. Al final del experimento, se observó una disminución de humedad del 10.5%, lo que representa la eliminación de 900 g de agua del aserrín. En contraste, en el último día, se notó que la muestra expuesta al clima exterior experimentó una reducción de humedad más lenta, con solo un 2% de pérdida total de humedad. Esta diferencia en los resultados se atribuye al clima controlado en la sala de secado y al funcionamiento constante de los sistemas aerotérmicos durante 8 días, alcanzando temperaturas de hasta 55°C en la sala. Estos hallazgos destacan la efectividad del ambiente controlado y el uso de sistemas aerotérmicos para lograr una reducción de humedad óptima. Es evidente que el clima controlado en la sala de secado brinda condiciones ideales para acelerar el proceso de secado y obtener un producto final de alta calidad.

Se observó que el ventilador centrífugo, utilizado en el interior de la sala de secado, alcanza temperaturas bastante altas para un motor de inducción, llegando a los 80°C en un día de diciembre. Aunque estas temperaturas no superan el límite máximo de 150°C que la aislación del motor puede soportar, el calor tiene efectos negativos a largo plazo en los rodamientos, la ventilación y la estructura del motor. Por lo tanto, se recomienda reubicar el ventilador centrífugo fuera de la sala de secado.

6.2 Trabajo Futuro

Estudiar la viabilidad de implementar nuevas tuberías en un estanque de agua existente en un costado del laboratorio de secado Geosolar, como solución al fallo y falta de transferencia de calor de la tierra en el sistema BCG. Esto permitiría mejorar la eficiencia del sistema y la transferencia de calor.

Realizar investigaciones adicionales para determinar posibles soluciones que permitan que el sistema fotovoltaico suministre la energía necesaria para el funcionamiento de la bomba de calor geotérmica en el laboratorio de secado. Se pueden explorar tecnologías y estrategias alternativas para optimizar el suministro energético.

Realizar investigaciones para determinar la ubicación óptima del motor del ventilador centrífugo del sistema aerotérmico UCSC, buscando un lugar fuera de la sala de secado que mejore su ventilación sin comprometer el rendimiento del caudal de aire. Esto permitiría evitar el calentamiento excesivo del motor y maximizar su vida útil.

Implementar un sistema de monitoreo remoto para el control de la bomba de calor geotérmica, especialmente en casos de pruebas de largo tiempo. Esto permitiría un mejor control y detección de fallos o alarmas de forma remota. Se pueden considerar sistemas como el inversor fotovoltaico Victron Energy, que cuenta con capacidades de monitoreo y configuración remota.

Realizar un estudio, simulación e implementación de un contenedor que facilite el secado del aserrín mediante el movimiento. Se ha demostrado que el centro del aserrín amontonado es el que más tiempo tarda en secarse, por lo que la implementación de movimientos mecánicos (idealmente de forma automática) podría reducir significativamente el tiempo de secado.

Incorporar un sistema de aislante térmico en el piso de la cámara de secado, con un espesor recomendado entre 60 mm y 120 mm. Aunque se cuenta con un sistema de calefacción de loza radiante, el aislante térmico ayudaría a evitar pérdidas de calor por el suelo, optimizando aún más la eficiencia energética.

7 Bibliografía

- [1] A. A. Jhonson, Secado de la madera, primera, Ed., Centro colombo canadiense de la madera: Sena, 1990.
- [2] A. A. V. CHÁVEZ, ANÁLISIS DEL POTENCIAL GEOTÉRMICO DE TRES TIPOLOGÍAS DE INTERCAMBIADORES PARA PROCESOS DE SECADO Y CLIMATIZACIÓN, Concepción : UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTISIMA CONCEPCIÓN, 2021.
- [3] A. M. Parra, «Distintas aplicaciones de bombas de calor acopladas al terreno en la zona geotérmica de la comarca de Cartagena,» UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA, Cartagena, 2015.
- [4] g. visiona, «<http://www.grupovisiona.com/>,» [En línea]. Available: <http://www.grupovisiona.com/img/funcionamiento.jpg>. [Último acceso: 24 enero 2023].
- [5] Konnen, «Water source heat pump wáter herater W02H Serie».
- [6] G. s. S.I., *Twinsolar Compacto, datos tecnicos*, Valencia, España: Grammer .
- [7] s. palau, VENTILADORES centrífugos de simple aspiración serie CMB/CMT, solerpalau.es.
- [8] V. Energy, *Manual Easy solar 24/1600/40-16 230V MPPT 100/50*.
- [9] V. energy, «Victron energy blue power,» [En línea]. Available: <https://www.victronenergy.com.es/>. [Último acceso: 8 junio 2022].
- [10] J. Diebel, «weatherspark,» Cedar Lake Ventures, Inc., 2013. [En línea]. Available: <https://es.weatherspark.com/m/24147/12/Tiempo-promedio-en-diciembre-en-Concepci%C3%B3n-Chile#Figures-Temperature>. [Último acceso: 08 diciembre 2022].
- [11] G. d. Chile, «Decreto S/N: Ordenanza sobre comercialización de leña, Temuco,» biblioteca del congreso nacional de Chile, 13 junio 2009.
- [12] I. J. David Funcs, «Estudio de Mercado de Bombas de Calor,» Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), de Chile, Santiago de Chile, enero de 2020.
- [13] Fontgas, «Bombas de calor geotérmica,» 05 julio 2019. [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=5vLG6d77FcY&t=10s>. [Último acceso: 25 mayo 2022].
- [14] P. C. califica, «Secado de la madera,» Talca, Chile, enero 2006.

- [15] I. M. E. A. García G, «Estado actual de desarrollo de las bombas de calor geotérmico,» Instituto de investigación eléctricas, México, 2012.
- [16] V. Energy, «Curso 4: Baterias de plomo Acido,» 2016. [En línea]. Available: <https://slideplayer.es/slide/12259352/>.
- [17] J. R. Sánchez, «Desarrollo de estrategia de modulación optimas para inversores asimetrico,» Departamento de medio ambiente y enería, Facultad de ingenieria, Universidad Catolica de la Santisima Concepción , Concepción, Chile , julio 2017.

Anexo A. Leyes y Normas Chilenas

7.1 Decreto S/N Temuco [10]

Extracto del documento “ordenanza sobre comercialización de leña”. Título 1, artículo 2°.

Leña: porción de madera en bruto de troncos, ramas y otras partes de árboles y arbustos, utilizada como combustible sólido residencial, comercial e industrial. Leña seca: aquella que posee un contenido de humedad menor al punto de saturación de la fibra; para propósitos de esta ordenanza se considera leña seca aquella que tiene un contenido máximo de humedad equivalente al 25% medida en base seca.

Anexo B. Teoremas y leyes matemáticos

7.2 Ley de Gay-Lussac

Establece una relación la temperatura y la presión de un gas cuando el **volumen** es constante. Esta relación se expresa en una constante de proporcionalidad (P.a./K). Al aumentar o disminuir la presión del gas, proporcionalmente también lo hará su temperatura (proceso isotrópico).

$$\frac{p}{T} = k \quad (\text{A.2})$$

Donde:

p : Presión del gas (Pa).

T : Temperatura absoluta (K)

k : Constante de proporcionalidad (Pa/K)

Anexo C. Ficha técnica equipos

7.3 Fluke 376 FC

Instrumento voltímetro y pinza amperimétrica CA y CC, con verdadero valor eficaz de voltaje y corriente para obtener mediciones exactas en señales no lineales. Clasificación de seguridad CAT IV 600 V, CAT III 1000 V

- Medición de corriente de CA y CC de 1000 A.
- Medida de tensión de CA y CC de 1.000 V.
- Rango de medida de 500 mV_{DC} para la conexión con otros accesorios.
- Grabación de entrada mín., máx. y media para capturar las variaciones automáticamente.
- La sonda de corriente flexible iFlex expande el rango de medición a 2.500 A de CA, proporciona acceso a grandes conductores ubicados en espacios reducidos (incluida).

7.4 Metrel MI 2883.

Analizador calidad de energía trifásico, diseñado para el registrar la energía y posteriormente calcular la eficiencia, herramienta para el registro a largo plazo de valores como voltaje, corriente y temperatura para posteriormente procesar los datos para el análisis in situ y comprobar los datos.

Instrumento Energy Master

- Pinzas de corriente flexible monofásica: 3000/300/30 A (A 1502), 3 Uds.
- Sonda de prueba (marrón, negro, gris, azul), 4, Uds.
- Pinza de cocodrilo (marrón, negro, gris, azul), 4 Uds.
- Cable de medición de la tensión (marrón, negro, gris, azul), 4 Uds.
- Etiquetas de codificación por colores
- Tarjeta de memoria microSD de 8,0 GB
- Lector de tarjeta microSD
- Software para PC PowerView3
- Cable USB• Adaptador de fuente de alimentación
- Batería recargable de 1,2 V, NiMH, 6 Uds.

7.5 Higrómetro Smart Sensor.

El higrómetro es un equipo para medir el porcentaje de agua en una sustancia determinada, siendo en su mayoría en maderas, usado para medir humedad de la leña de calefacción para poder aprovechar el óptimo de capacidad calorífica de ésta.

- Marca: Smart Sensor.
- Modelo: AS971.
- Origen: China.
- Rango medición: A) 2% ~ 40%. B) 2% ~ 50%. C) 2% ~ 60%. D) 2% ~ 70%.
- Resolución: 0.5%

Anexo D. Corrección Gráficas de temperatura

Ajuste de datos tiempo: El archivo `xlsx` entrega la columna 1 es el tiempo de cada muestreo con fecha y hora, con el comando “reemplazar” de Excel eliminando la fecha y dejando solo la hora, para continuación dar formato a la columna, seleccionando todos los datos columna 1 y en Inicio/Numero seleccionar formato HORA.

En el código de Matlab extrae los datos del archivo Excel con el comando “`xlsread`” siendo 14 columnas, y separar los datos por columnas y asignando un nombre con el comando `data`:

```
data=xlsread('20 04 2022 8715_EasyModbusLog_.xlsx'); % importación datos Excel
time=data(:,1); %vector datos tiempo
```

Al momento de graficar, el tiempo lo mostrara como un numero con el formato “0.XXX”, para darle la forma de tiempo en horas se debe utilizar el comando `datetick('x',T)` cual viene a continuación del comando `plot()`, dando el formato a tiempo, la variable ‘n’ es para modificar la forma de mostrar el tiempo como se muestra en la línea de código a continuación.

```
T=15; %formato hora comand "datetick"; 16:'HH:MM PM', 15:'HH:MM' 13:'HH:MM:SS',
14:'HH:MM:SS PM'
Plot(); % Gráfica
datetick('x',T) %formato tiempo en el eje x con la forma 15:'HH:MM'
```

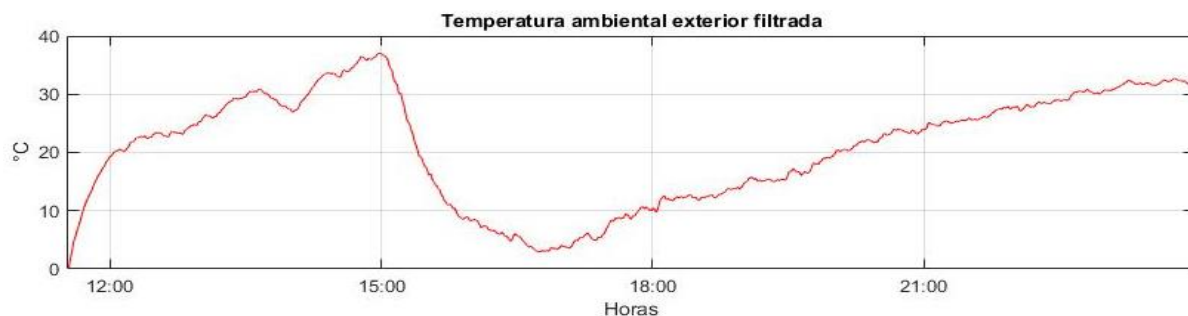


Fig. 69. Gráfica temperatura con el eje x en horas y minutos uso comando `datetick` de Matlab.

Filtro datos para Gráficacurva: Los registros de temperatura obtenidos son captados por una termocupla establecido el registro de un intervalo de 1 a 3 segundos, pasando por un procesamiento

de datos a digital. En casos se presentaba un registro de datos poco lineal con variaciones de más de $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ en un segundo, resultando una gráfica inexacta, efecto atribuido por humedad en las termocupas en temporada de invierno.

Se aplica un filtro pasa bajo con el comando `fdesign.lowpass` estableciendo las especificaciones del filtro de la siguiente manera:

```
% aplicacion de filtro de señal
% diseño
N=1; % orden del filtro
Fp=0.0005; %frecuencia de corte
Fs=1/30;%frecuencia de muestreo
Ap=10; %
As=60; %
h=fdesign.lowpass('N,Fp,Ap', N, Fp, Ap, Fs);
```

A continuación, se aplica el filtro diseñado anteriormente, con el comando `filter` a la señal a trabajar, asignado un nombre para la nueva señal filtrada, para luego ser graficada.

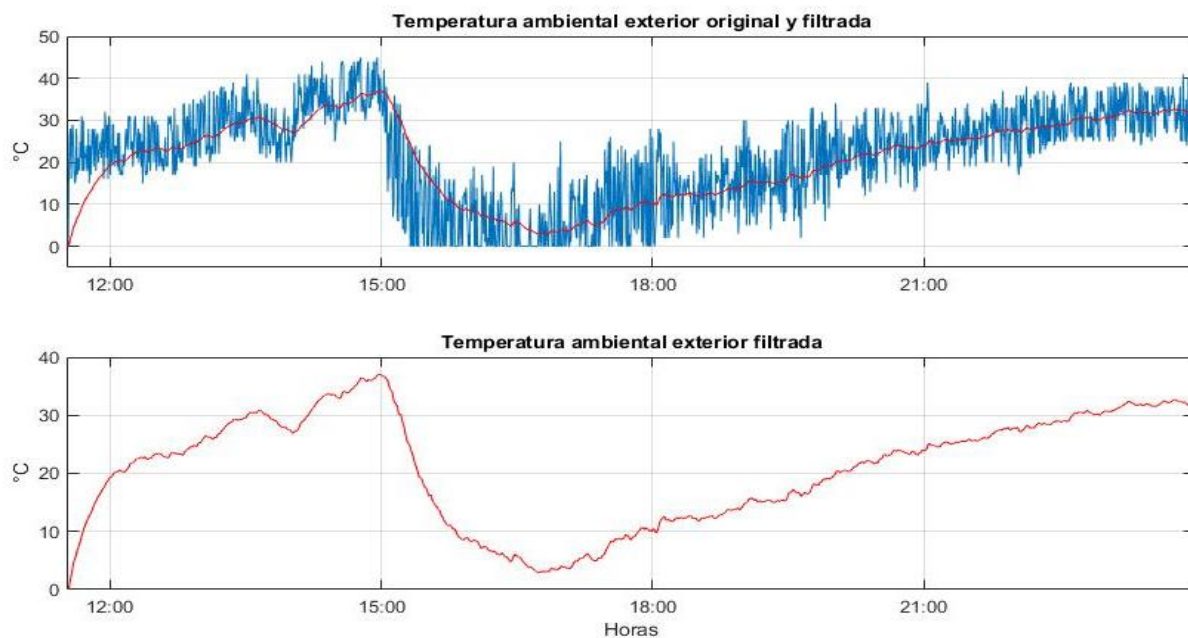


Fig. 70. Gráficas superior comparación señal original (azul) vs señal filtrada. Inferior señal filtrada.

En la figura 30 se comparará la misma señal, pero una es la original (azul) y la señal con el efecto del filtro pasa bajo (rojo) siendo esta una línea mucho más definida, se aprecia que la señal filtrada representa el comportamiento de la original, considerándola como la media de la misma.

En el inicio de la curva tiene una desviación de la señal original, ya que el primer valor de la serie de datos es 0 para en un instante tomar un valor cercano a los 20°C, por lo tanto, el filtro iniciara en cero para tomar los valores de acuerdo a la frecuencia de muestreo